

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE ESCORIAS DE FERRONÍQUEL APARTIR
DE MINERALES LATERÍTICOS DE BAJO TENOR PARA POSIBLES USOS
INDUSTRIALES**

EDISON HUMBERTO LÓPEZ PULIDO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2018**

**CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE ESCORIAS DE FERRONÍQUEL APARTIR
DE MINERALES LATERÍTICOS DE BAJO TENOR PARA POSIBLES USOS
INDUSTRIALES**

**Trabajo de grado para obtener el título de
INGENIERO METALÚRGICO**

**Director:
ING. ÁLVARO FORERO PINILLA**

**Co-directora:
PhD. SANDRA DÍAZ BELLO**

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA
TUNJA
2018**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Tunja, 20 de febrero de 2018

La autoridad científica de la facultad de ingeniería reside en ella misma, por tanto no responde por las opiniones expresadas en este proyecto de investigación.
Se autoriza su uso y reproducción indicando su origen.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	13
INTRODUCCIÓN.....	14
1. MARCO REFERENCIAL.....	17
1.1 TRANSFORMACIÓN Y BENEFICIO DE MINERALES LATERÍTICOS.....	17
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FERRONÍQUEL.....	18
1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS DE FERRONÍQUEL.....	21
1.4 FASES MICROESTRUCTURALES PRESENTE EN ESCORIAS DE FERRONÍQUEL.....	24
1.5 USOS DE LAS ESCORIAS.....	25
1.5.1 En cerámicos.....	25
1.5.1.1 Arcillas.....	26
1.5.1.2 Composición química de las arcillas.....	27
1.6 USOS DE LAS ARCILLAS.....	29
1.6.1 En ladrillos.....	29
1.6.2 En refractarios.....	29
1.6.3 En porcelana.....	29
1.6.4 En azulejos.....	29

1.6.5 En vidrios.....	30
1.6.6 En cementos.....	31
2. ESTADO DEL ARTE.....	33
3. METODOLOGÍA.....	35
4. CARACTERIZACIÓN ESCORIAS DE FERRONÍQUEL.....	38
4.1 ANÁLISIS QUÍMICO.....	39
4.1.1 Espectroscopía de Absorción Atómica.....	39
4.1.2 Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X.....	39
4.1.3 Petrografía.....	40
4.2 ANÁLISIS FÍSICO.....	41
4.2.1 Densidad promedio, densidad relativa y porcentaje de absorción.....	41
4.3 ANÁLISIS MINERALÓGICO.....	42
4.3.1 Microscopia Electrónica de Barrido.....	42
4.3.2 Difracción de rayos X.....	43
5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	45
5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE FERRONÍQUEL.....	45
5.1.1 Propiedades químicas.....	45

5.1.1.1 Composición química por Fluorescencia de rayos X.....	45
5.1.1.2 Composición química por Absorción Atómica.....	48
5.1.1.3 Petrografía.....	51
5.1.2 Análisis físico.....	55
5.1.2.1 Basicidad.....	55
5.1.2.2 Peso Unitario, Peso Específico Saturado Superficialmente y Peso Específico Seco.....	56
5.1.3 Características estructurales y morfológicas.....	56
5.1.3.1 Microscopía Electrónica de Barrido.....	56
5.1.3.2 Difracción de rayos X.....	61
 6. EVALUACIÓN DE USOS POTENCIALES DE ESCORIA DE FERRONÍQUEL EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN.....	 66
6.1 ANÁLISIS QUÍMICO.....	66
6.1.1 Espectroscopía de absorción atómica y fluorescencia de rayos X.....	66
6.2 ANÁLISIS FÍSICO.....	76
6.2.1 Peso Unitario, Peso Específico Saturado Superficialmente y Peso Específico Seco.....	76
 7. CONCLUSIONES.....	 82
 8. RECOMENDACIONES.....	 83
 9. BIBLIOGRAFÍA.....	 84

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 Producción de ferroníquel.....	19
FIGURA 2 Clasificación materiales cerámicos.....	26

LISTA DE IMÁGENES

Pág.

Imagen 1 Análisis cuantitativo de especies mineralógicas de una escoria típica con relación SiO_2 de 2.7% y Al_2O_3 de 2.8%.....	24
Imagen 2 Flujómetro procedimiento experimental.....	35
Imagen 3 Muestras de ensayo escorias de ferroníquel a malla #100.....	38
Imagen 4 Espectrómetro de fluorescencia de rayos X.....	40
Imagen 5 Microscopio electrónico de barrido.....	42
Imagen 6 Difractómetro de rayos X.....	43
Imagen 7 Espectro fluorescencia de rayos X muestra #1.....	50
Imagen 8 Espectro fluorescencia de rayos X muestra #2.....	50
Imagen 9 y 10 Micrografías a 20X con polarizadores paralelos y cruzados-.....	50
Imagen 11 y 12 Micrografías a 10X con polarizadores paralelos y cruzados.....	53
Imagen 15 Rayos presentados y usados en el MEB.....	57
Imagen 16 Difractograma de rayos X para la muestra de escoria #2.....	61
Imagen 17 Difractograma de rayos X para la muestra de escoria #3.....	62
Imagen 18 Diagrama de resultados de composición porcentual de la muestra #3.....	63

Imagen 19 Diagrama ternario $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$	73
Imagen 20 Diagrama ternario $(\text{MgO-FeO}) (\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3)(\text{SiO}_2)$	74
Imagen 21 Diagrama ternario $(\text{MgO-FeO}) (\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3)(\text{SiO}_2)$	75
Imagen 22 Densidad vs. Resistencia.....	80

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1 Variación composición química por óxidos.....	47
Gráfico 2 Variación composición química por elementos.....	47
Gráfico 3 Composición química por elemento de escorias de ferroníquel con espectrómetro de absorción atómica.....	48
Gráfico 4 Apreciación cualitativa variación composicional porcentual de las escorias.....	49
Gráfico 5 Promedio índice de hidraulicidad de algunos productos industriales.....	54
Gráfico 6 Variación composición química muestras de escoria.....	57
Gráfico 8 Diagrama de barras de composiciones químicas de productos cerámicos, arcillas y escorias de ferroníquel.....	70
Gráfico 9 Diagrama de contraste composicional de la escoria, de la arcilla y la mezcla 50.50.....	71
Gráfico 10 Diagrama variación química de la escoria.....	72
Gráfico 11 Variación propiedades físicas de agregados.....	76

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Composición química escoria de ferroníquel CMSA.....	21
Tabla 2 Composición química escorias de ferroníquel en algunos países extractores del mundo.....	22
Tabla 3 Composición química de las arcillas.....	28
Tabla 4 Intervalos de composición química frecuentes en los vidrios comunes.....	30
Tabla 5 Intervalos porcentuales composicionales de la escoria a emplear en la fabricación de cementos.....	32
Tabla 6 Composición química de las escorias de ferroníquel por el método de fluorescencia de rayos X por elementos y por óxidos.....	46
Tabla 7 Composición química porcentual por Espectroscopía de absorción atómica.....	48
Tabla 8 Especies mineralógicas encontradas en las muestras de escoria de ferroníquel.....	52
Tabla 9 Variación propiedades físicas de agregados.....	56
Tabla 10 Micrografías de microscopia electrónica de barrido.....	58
Tabla 11 Micrografías, espectro y resultados cuantitativos de cada una de las muestras de escorias de ferroníquel.....	60
Tabla 12 Especies mineralógicas encontradas en las muestras de escorias de ferroníquel.....	64
Tabla 13 Fases cristalinas presentes en la escoria.....	64
Tabla 14 Composición química escorias colombianas de ferroníquel.....	67
Tabla 15 Composición química de productos cerámicos, arcillas y escoria ferroníquel analizada.....	68

AGRADECIMIENTOS

Sinceros agradecimientos a mis tutores, Ingeniero Álvaro Forero Pinilla, y a la Doctora Sandra Díaz Bello, por su compromiso, dedicación y dirección del proyecto, pero sobre todo, por su paciencia y confianza depositada en mí,

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a las personas que más me han influenciado en la vida, dándome los mejores consejos, guiándome en el camino, ayudándome a ser una persona de bien y útil a la sociedad, con todo mi amor y afecto se lo dedico:

A mi padre, *Néstor López*, quien siempre me apoyo en alcanzar mis metas, me ayudo en las buenas y en las malas, nunca soltó mi mano, a pesar de las duras adversidades presentadas. Siempre anhelo ver a sus hijos educados y preparados íntegramente, para así contribuir con un grano de arena en la construcción de una mejor sociedad. A él le dedico este logro, sin el quizás no lo hubiese logrado.

A mis profesores, grandes e inolvidables maestros, por sus enseñanzas dadas en las aulas de clase, conocimiento para el futuro.

A mi novia, *Yessica Buitrago*, dulce y hermosa niña. Mi inspiración para salir adelante y ver el mundo desde otro ángulo.

A mis amigos, por su aliento y motivación dados en la consecución de mis objetivos. Hermanos eternos.

A Bruno, mi amigo fiel.

RESUMEN

Este trabajo consistió en la caracterización de propiedades físicas, químicas y mineralógicas de las escorias de ferroníquel obtenidas a partir del procesamiento de minerales lateríticos de bajo tenor, con el objetivo de encontrarles posibles usos potenciales en la industria de la construcción, mitigando los efectos negativos en materia ecológica, económica y social.

Para esto se caracterizaron las escorias con Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Absorción Atómica, para la determinación de su composición química. Así mismo, se practicó Petrografía para identificar las fases micro estructurales presentes; peso unitario, densidad real, densidad real del agregado superficialmente seco y densidad real aparente y porcentaje de absorción. Igualmente, Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) para analizar su morfología superficial, y Difracción de Rayos X (DRX) para identificar las posibles especies químicas mineralógicas presentes.

Los resultados obtenidos por FRX indican que tiene es 7.7% Na₂O, 12% MgO, 4.55% Al₂O₃, 44.9% SiO₂, 0.37% SO₃, 0.06% K₂O, CaO 0.77%, TiO₂ 0.11%, CrO₂ 1.96%, MnO 1.17%, FeO, 25.9%, NiO, 0.29% y CuO 0,1%. Igualmente se encontró que estaba compuesta mineralógicamente por Pigeonita en un 63%, Enstatite en un 32.3%, y 4% de cuarzo.

Se encontró también que morfológicamente estas escorias de ferroníquel no guarda similitud con las arcillas, principalmente porque estas fueron enfriadas a temperatura ambiente y tuvieron el suficiente tiempo para alcanzar presentar cristalización, contrario a las arcillas, que son de naturaleza amorfa y laminar. Sin embargo, por ser muy similar en su composición química con las arcillas, estas pueden alcanzar morfologías como la de estas a altas temperaturas, como lo sugieren los diagramas ternarios.

Con esta caracterización se puede establecer su posibilidad de uso en función de la composición química, dando así una gama de opciones de utilización, en pro de la reutilización de uno de los productos de la industria siderúrgica más contaminantes y dañinos con el medio ambiente.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del mundo se ha investigado sobre el aprovechamiento de las escorias siderúrgicas tanto ácidas como básicas, obteniéndose buenos resultados con estas últimas, pues su basicidad le permite incursionar sin mayor problema en la industria de la construcción, principalmente. En Colombia, las escorias de ferroníquel han llamado especialmente la atención en la última década, no solamente por el posible uso industrial que estas pudieran tener, sino además por el impacto negativo que tiene en el ámbito social, ambiental y económico que estas generan.

La Universidad Nacional de Colombia en el año 2012, realizó un estudio en donde se buscó la posibilidad de utilizarlas en cementos y concretos, lográndose obtener resultados positivos, aunque sugiriéndolo solo para cementos tipo 1 nacional, dadas sus menores exigencias. Sin embargo, el problema que representan estas escorias sigue latente, ya que aunque en la actualidad se están usando en baja intensidad para la fabricación de cementos para carreteras, no se les ha dado una disposición que mitigue de una manera más significativa los efectos negativos directos e indirectos de las escorias, pues en la fabricación de cementos en si también generan contaminación ambiental, debido a las reacciones químicas de hidratación de los cementos y producción de dióxido de carbono.

No existen estudios de escorias de ferroníquel que indiquen la posibilidad de emplearlas en otros productos industriales, como ladrillos, tejas y adoquines, entre otros, los cuales requieren condiciones físicas y químicas más flexibles con relación a la de los cementos y concretos, ya que estos últimos tiene solicitudes más altas. Al vislumbrarse la viabilidad de uso de estas escorias para la fabricación de estos productos, no solamente se vería beneficiada la empresa, ya que los recursos económicos que invierte en el mantenimiento de estas se verían reducidos, sino también se beneficiaría el medio ambiente, al verse los daños ambientales reducidos, y también las comunidades, pues se podrían fabricar ladrillos, tejas y adoquines para construcción de pequeñas viviendas y en la construcción de vías peatonales y de tráfico liviano, que tanta falta hacen en las comunidades poblacionales aledañas.

Se requiere caracterizar las escorias de ferroníquel física, química y mineralógicamente de manera más amplia para poder eventualmente sugerirles algún uso industrial, beneficiándose la planta productora, el medio ambiente, las comunidades y, desde luego, la academia, pues se sienta un precedente en esta área, dada la inexistencia de estudios en donde se caractericen de esta forma y al mismo tiempo sugieran usos no solamente para cementos o concretos, sino también para otros usos alternativos de relativas bajas solicitudes como los adoquines y las tejas, que incluso podrían reemplazar a las tejas de zinc, declaradas tóxicas recientemente junto con otros productos de similar composición química.

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 TRANSFORMACIÓN Y BENEFICIO DE MINERALES LATERÍTICOS

Colombia, por encontrarse en la zona tropical de la Tierra, extrae el níquel principalmente de minerales lateríticos, hoy por hoy de bajo tenor. Este níquel se encuentra diseminado en la mena. Uno de los métodos de extracción de níquel, en este tipo de depósitos, es el de lixiviación amoniaca, el cual es el más empleado en nuestro país, este método se basa en el hecho de que el Ni posee propiedades específicas de asociarse con el Amoníaco, formando complejos de tipo amínico. ¹

El proceso de extracción de níquel de los depósitos de lateritas niquelíferas se podría explicar de la siguiente manera:

Todas las menas de níquel que han sido formadas debido a transformaciones climáticas de la Peridotita o rocas similares y que tienen suficiente contenido metálico, son aptas para el tratado amoniaca, después de su reducción en condiciones apropiadas. La tostación reductora en las lateritas niquelíferas, es el aspecto más crítico, ya que es necesaria la selectividad del mismo, de forma que todo el níquel presente, pase al estado metálico, sin que simultáneamente, se originen cantidades apreciables de hierro metálico. ²

En las lateritas niquelíferas se indica claramente la factibilidad de esta reducción selectiva, pero desde el punto de vista económico, es necesario lograr velocidades de disminución aceptables que implicarían la rebaja de los óxidos de hierro con una pequeña formación de hierro metálico. Bajo condiciones reductoras, el óxido de níquel se reduce a níquel metálico finamente dividido, mientras que el óxido de hierro presente en las lateritas, lo hace en forma de magnetita y en pequeñas cantidades de hierro metálico. ¹

Cabe destacar, que el hierro tiene un efecto inhibidor sobre la solubilidad del níquel al formar soluciones sólidas, lo que facilita la extracción del mismo. El producto resultante de esta reducción es sometido a un proceso de lixiviación o lavado con amoníaco, obteniéndose el níquel metálico con un alto grado de pureza. ²

¹ Wilman, F., Cruz, R. & Rojas, I.F., 2009. No Title. *el níquel de colombia*, p.44. Yanet,

² Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferromanganeso de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13-28.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE FERRONÍQUEL EN COLOMBIA

En Colombia existen diferentes unidades de producción las cuales interactúan entre sí en el proceso de obtención de ferroníquel, dando como resultado metalúrgico un producto que cumple con las especificaciones exigidas por los clientes, que en la mayoría de los casos son extranjeros. Las normas ambientales, de seguridad y seguridad industrial se cumplen con rigurosidad.³

La extracción de los materiales se hace mediante voladura selectiva para poder reducir las rocas de tamaño hasta obtener tamaños inferiores a los dos metros de diámetro.³

La mena se extrae por minería a cielo abierto -open pit -, y se almacena en súper pilas o stocks de 100.000 toneladas métricas aproximadamente según la calidad (%Ni), de allí se llevan en camiones de 50 toneladas a la trituración donde se mezclan a fin de obtener un material homogéneo y procesarlo en la planta de fundición que se ubica cerca de la mina. La planta de fundición produce gránulos de ferroníquel de alta pureza (37,5% de níquel) con bajo contenido en carbono, por lo que son usados exclusivamente en la producción de acero inoxidable. La escoria que es depositada en pilas puede ser reprocesada posteriormente.¹

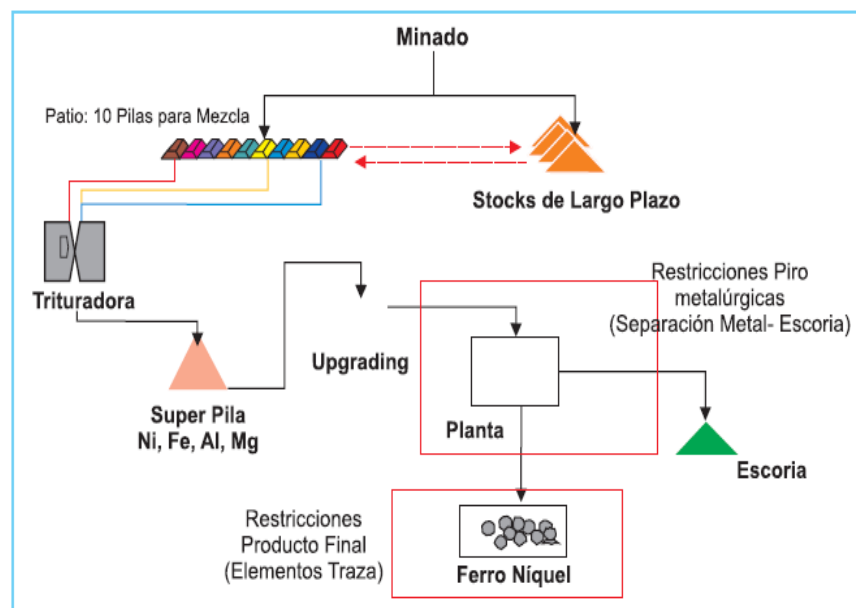
La planta de fundición, localizada en boca de mina, tiene una capacidad nominal de 50.000 Ton/año.

La producción consta de cuatro fases principales:

- Fase de secado y almacenamiento de mineral parcialmente seco.
- Fase de calcinación. hornos calcinadores 1 y 2.
- Fase de fundición. hornos eléctricos 1 y 2.
- Fase de refinación.
- Fase de manejo de producto terminado

³ Ministerio de Minas y Energía, 2009. Así Es La Minería. *Colombia Minera*, 1, p.31. Available at: www.minminas.gov.co

FIGURA 1 Producción de ferroníquel.



FUENTE: MONTERROZA, Nelson R. Optimización de Reservas en el complejo minero-metalúrgico Cerro Matoso S.A. Septiembre de 2007.

En la fase de homogenizado el mineral extraído del depósito laterítico, primero se le disminuye la granulometría a menos de 6.35 mm de diámetro para poder ser homogenizado y luego se deposita en dos superpilas, obteniéndose así un mineral homogéneo y húmedo a la fase de secado y almacenamiento de mineral parcialmente seco. En esta fase el mineral se seca parcialmente (10%-12% de humedad) en hornos secadores y se almacena en silos como reserva de material semiseco para entregarlo a las fases de calcinación de las líneas 1 y 2, donde este se calcina y sufre una reacción química de reducción parcial, produciéndose una calcina pre-reducida a las fases de fundición, en donde se completan las reacciones químicas de reducción y se funde la calcina para así obtener metal líquido para llevarlo a la fase de refinación-granulación. En esta zona de secado, se presenta una pérdida de agua superficial o mecánica por medio de la evaporación, a una temperatura que oscila entre los 30 y 200°C.⁴

En la zona de pre-reducción es donde se produce la pérdida de agua química del mineral y la pérdida de volátiles del carbón. Esto sucede en un rango de temperaturas que va desde los 200°C hasta los 600°C.

Y, por último, la zona de reducción oscila entre los 600 y 1100°C.

⁴ Oxley, A. & Barcza, N., 2013. Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, pp.2-13

Esta mezcla, junto con el carbón y los finos producidos antes reaccionan con la atmosfera del horno rotatorio, produciendo una calcina caliente, después de haber sufrido cambios químicos y físicos.

Esta calcina producida se dirige luego a los hornos eléctricos, donde es fundida y donde se completan las reacciones de reducción de los óxidos de hierro y níquel, gracias al carbón residual. Es aquí donde se producen dos fases claramente diferenciadas: una fase densa, el baño líquido, y una fase menos densa, la escoria.⁴

El metal es colado en hornos y se transporta en crisoles a la sección de refinación. La escoria es granulada gracias al choque térmico presentado por el contacto con agua (esta granulación tiene incidencia importante al momento de usarse como elemento constitutivo en la fabricación de cementos hidráulicos).

En la etapa de reducción, el ferroníquel líquido que viene en los crisoles es pesado para así iniciar el proceso de refinación, que consiste en la disminución del porcentaje de impurezas indeseables en el metal, como el Si, C, S y P), y lograr un producto con la composición química deseada, y alcanzar la temperatura ideal para granularla. Esta es clasificada por sus diferentes tamaños, se empaca en bolsas sintéticas resistentes y enviadas al puerto de Cartagena, de donde se llevan al exterior.⁵

1.3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS ESCORIAS DE FERRONÍQUEL

La escoria es una mezcla fundida de diferentes óxidos, los cuales forman varios compuestos con múltiples soluciones sólidas, líquidas y eutécticas. Su función principal es extraer todos los elementos indeseables del baño líquido, mantener estable la temperatura actuando como capa protectora de los gases presentes en el interior del horno, y servir como indicador del proceso metalúrgico, ya que también sirve para gobernar la eficiencia del proceso de refinación gracias a la interacción de las interfaces metal-escoria.⁶

Básicamente son tres tipos de óxidos que podemos encontrar en las escorias:

- Óxidos ácidos: SO_2 , P_2O_5 , SiO_2
- Óxidos básicos: BaO , Cu_2O , Na_2O , CaO , FeO , PbO , MgO
- Óxidos anfóteros: Al_2O_3 , ZnO .

⁵ Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28.

⁶ Wilman, F., Cruz, R. & Rojas, I.F., 2009. No Title. *el níquel de colombia*, p.44.

Sin embargo, este tipo de escoria no es básica, a pesar de contener óxidos como el CaO, FeO, MgO, debido a que la fracción de SiO₂ es mayoritaria en la escoria, esta escoria es ácida. ⁶

En 2007 en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia se determinó la composición química de una escoria típica de ferroníquel. Y en 2013, en Cuba, se determinó igualmente la composición química a una escoria también de Cerro Matoso, observándose, tras comparación de datos, que la variación no es significativa, especialmente porque el único que no fluctúa es el níquel.

TABLA 1 Composición química escoria de ferroníquel de CMSA, Uptc.

FECHA	COMPONENTE	Al ₂ O ₃	Fe	FeO	Ni	SiO ₂	$\frac{\text{SiO}_2}{\text{MgO}}$	MgO
04-Jun-06 00:42		2,80	14,12	18,17	0,19	54,46	2,70	20,20

Fuente: (Pérez, 2007)

Las escorias obtenidas en el proceso de obtención de ferroníquel en los hornos eléctricos es un material no metálico, donde están presentes óxidos y silicatos. Estas son las encargadas de facilitar las reacciones químicas de los procesos de fusión, en donde más se producen, y en el afino. ⁷

En el desarrollo de este proceso se presentan dos fases claramente diferenciadas, gracias a las diferencias de densidades que tiene, situándose en el fondo del horno la fase más densa, que corresponde al baño metálico, y la otra menos densa, sobrenada el metal fundido, la escoria. Esta representa alrededor del 70% de la carga del horno de arco eléctrico. ⁷

En la siguiente tabla tenemos las composiciones químicas de algunas de las plantas productoras de ferroníquel más importantes del mundo, dentro de las cuales se encuentra Cerro Matoso.

⁷ Carvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. , p.135.

TABLA 2 Composición química escorias de ferroníquel en algunos países extractores del mundo.

Plantas productoras	País	Compuestos Óxidos						
		NiO	CoO	FeO	MgO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃
ferroníquel Moa	Cuba	0,14	0,015	7,6	35,03	44,28	2,85	3,7
Aneka	Indonesia	0,07	0,01	4,5	32,7	56,7	7,51	2,05
Cerro Matoso	Colombia	0,25	0,02	14,7	20	55,5	ND	2,3
Falcondo	Rep. Dominicana	0,14	0,01	13,9	29,3	43,4	ND	2,6
Hyuga	Japón	0,07	0,002	10,9	31,1	50,9	0,52	ND
Larco	Grecia	0,15	0,02	32,7	3,1	36,8	ND	7,9
Loma de Níquel	Venezuela	0,11	0,02	11,8	36,6	45,3	0,55	2,1
SLN Eramet	Nueva Caledonia	0,14	0,02	5,74	31,4	55,8	ND	0,9
Nippon Yakin	Japón	0,22	ND	7,17	25,6	48	5,4	1.23
Pacific Metals	Japón	0,07	0,02	11,6	32,6	49,6	ND	1,6

ND: No determinada

Fuente: (Ramírez-cruz et al., 2013)

Estas escorias posteriormente son evacuadas, y antes de colocarse en los botaderos dispuestos para ello, son enfriadas con agua, presentándose choque térmico, para que se granulen. Este aspecto es importante, ya que por la granulación es que estos áridos adquieren propiedades hidráulicas latentes.

La temperatura debe ser controlada a 1650° C. Por medio de la temperatura se controla parcialmente la composición química de la escoria, y por ende, del baño metálico. La importancia de esto radica en que optimizando la composición química de la escoria se puede:

- Ajustar el contenido de níquel, el cual se controla por medio del FeO y NiO en la escoria
- Ajustar la permeabilidad de la interfase metal escoria por medio de una baja viscosidad en la escoria
- Minimizar pérdidas energéticas al reducirse la conductividad térmica
- Cuidar el refractario del horno, al evitarse sobrecalentamientos.⁸

El contenido en las escorias de ferroníquel de FeO, MgO y SiO₂ son de suma importancia, ya que dependiendo de las proporciones en que estos se encuentren en las escorias se controla la temperatura, la viscosidad y la conductividad térmica.

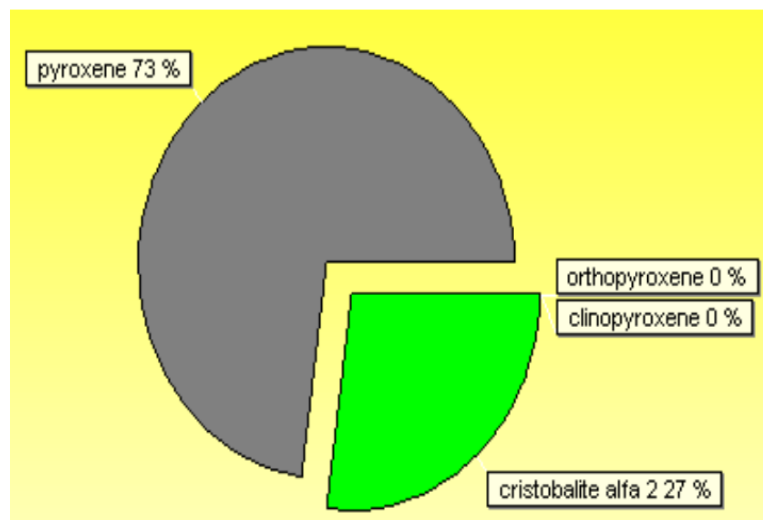
⁸ Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.

La relación CaO/MgO es la relación que indica la acidez o la basicidad de una escoria. En este caso no se usa esta fórmula debido a que la presencia de CaO en las escorias de ferromanganeso es casi nula. En cambio se usa la relación SiO_2/MgO para determinar su naturaleza. Si la relación es mayor a uno entonces la escoria es ácida, pero si es menor entonces será básica. Esta relación permite determinar su viscosidad, la cual es la que mide la fluidez de esta, que está relacionada con la facilidad de escorificación.⁹

1.4 FASES MICROESTRUCTURALES PRESENTES EN ESCORIAS DE FERROMANGANESE

En general las escorias suelen tener la misma composición química esencial. Las escorias de ferromanganeso deben sus fases microestructurales, más que a su composición química, al tipo de enfriamiento recibido. En la siguiente figura se observa las fases microestructurales típicas de una escoria colombiana de ferromanganeso.

FIGURA 2 Análisis cuantitativo de especies mineralógicas de una escoria típica con relación SiO_2 de 2.7 y a 2.8% de Al_2O_3



Fuente: Pérez, 2007

Para determinar si un material, como la escoria siderúrgica, es idónea o no para su uso en la fabricación de algún producto, se debe tener en cuenta que existen propiedades **fundamentales** y **simuladas**. Una propiedad fundamental lo es cuando es intrínseca al material, como por ejemplo la composición química, densidad real, entre otras. En contraste, una propiedad es simulada cuando se simula en el laboratorio un ensayo

⁹ GOEHNER, Raymond P. y Nichols, Monte C. X/ ray powder diffraction. ASM Characterization. P.p. 334/343. Carvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Portland. , p.135.

para su determinación, en donde se reproducen lo mejor posible las condiciones a las que se va a ver expuesto el material del que formara parte, como resistencia a la compresión y a la flexión.¹⁰

Para asegurar con certeza la idoneidad o no de un material para emplearse como materia prima en la fabricación de algún producto industrial, sería menester tener en cuenta estas dos clases de propiedades, pero para sugerirles algún uso será suficiente con la evaluación de sus propiedades fundamentales, primeramente porque son las que primero se deben tener en cuenta al momento de realizar este tipo de evaluaciones, y segundo porque de esta forma es posible sugerir varios posibles usos industriales, abriendo así la puerta a futuras investigaciones para su empleo, ya que en Colombia, los estudios existentes han sido enfocados solamente al aprovechamiento en concretos, soslayando la posibilidad de uso en otros productos, una vez establecida una armoniosa relación rentabilidad-medio ambiente-factibilidad.⁹

En ese orden de ideas, solo se tendrán en cuenta las propiedades fundamentales, para así poder sugerir los potenciales usos, y llamar la atención de las plantas productoras de ferroníquel, y hacerles ver que no solamente si es posible darles rápidamente un fin productivo a estas escorias, sino que además se puede mitigar el impacto ambiental y beneficiar significativamente a las comunidades.

1.5 USOS DE LAS ESCORIAS

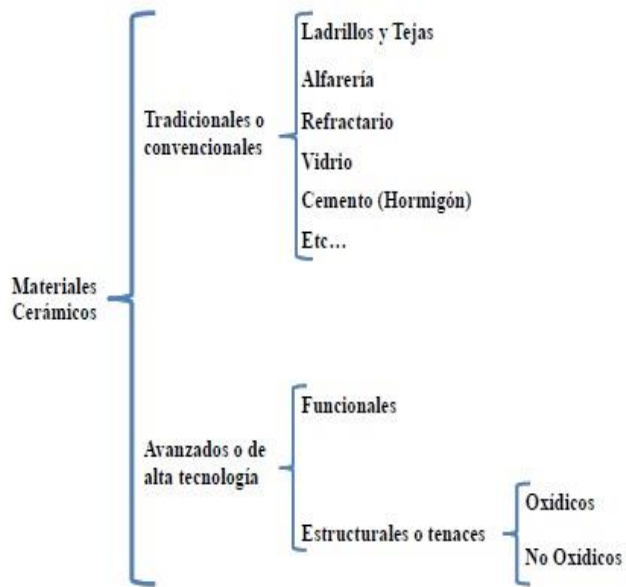
1.5.1 En cerámicos

Un cerámico está constituido por sólidos inorgánicos metálicos y no metálicos, fabricado por tratamiento térmico. Las cerámicas tradicionales están hechas de arcilla, la más básica es el barro común o barro rojo, que está formado por silicatos de aluminio procedentes de la descomposición de otras rocas primarias y puede tener diferentes impurezas como óxido de hierro que le da el tono rojizo. Pueden incluir en su composición átomos metálicos como el hierro o el aluminio.

Los cerámicos son uno de los varios tipos de materiales industriales. Para una mayor comprensión, se resume en el siguiente mapa conceptual la clasificación de estos, junto con algunos ejemplos:

¹⁰ Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28.

FIGURA 2 Clasificación materiales cerámicos



Fuente: <http://fpeingenieriaelectrica.blogspot.com.co/2016/05/materiales-ceramicos-y-compuestos.html>

Estos productos tienen en común sus constituyentes principales, como lo es el SiO_2 , la Al_2O_3 , el MgO y el CaO , en diferentes proporciones, en forma general. Pero estos se pueden reorganizar para entender cuantitativamente mejor las materias primas que los conforman. En la siguiente tabla se muestra que en la fabricación de porcelanas, ladrillos y tejas se usa siempre arcilla en determinada cantidad.

Estos compuestos químicos se encuentran en las arcillas, las cuales al ser tratadas térmicamente se obtienen los cerámicos. En razón a esto, es pertinente un espacio para estas.

1.5.1.1 Arcillas

Se da el nombre de arcilla a aquellas partículas sólidas con un diámetro menor de 0.005 mm que tienen la característica de adquirir plasticidad, ductilidad y maleabilidad cuando se mezclan con agua. Químicamente, es un silicato de alúmina hidratado, aunque en algunas ocasiones contiene silicatos de hierro o de magnesio.

La arcilla se compone de un grupo de minerales aluminosilicatos formados por la meteorización de rocas feldespáticas, como el granito. El grano es de tamaño microscópico y **con forma de escamas**, esto hace que la superficie de agregación sea

mucho mayor que su espesor, lo que permite un gran almacenamiento de agua por adherencia, dando plasticidad a la arcilla y provocando la hinchazón de algunas variedades.¹¹

La abundancia de la arcilla en la naturaleza, su relativa facilidad de tratamiento y la resistencia e impermeabilidad de este elemento lo convirtieron en un material profusamente utilizado por las sociedades antiguas.

1.5.1.2 Composición química de las arcillas

La determinación de la composición química de las arcillas es imprescindible en la evaluación del uso específico que se le dará. No obstante, tal información debe ser usada en conjunto con las propiedades físicas para un análisis más completo.

Las arcillas están conformadas básicamente por arcilla pura, la que a su vez está constituida por un 47% de sílice, 39% de alúmina y un 14% de agua. Se recomienda que deba haber como mínimo un 25% de arcilla pura en la mezcla.

En la siguiente tabla tenemos la composición química estandar de las arcillas:

TABLA 3 Composición química de las arcillas

	<i>Tierra como un todo</i>	<i>Arcilla roja común</i>
SiO ₂	59,14	57,02
Al ₂ O ₃	15,34	19,15
Fe ₂ O ₃	6,88	6,70
Mg O	3,49	3,08
CaO	5,08	4,26
Na ₂ O	3,84	2,38
K ₂ O	3,13	2,03
H ₂ O	1,15	3,45
TiO ₂	1,05	0,91

Fuente: http://ceramica.name/tecnologia_ceramica/arcilla/Arcilla.html

¹¹ Hernández, Y., Carriazo, J.G. & Almanza, O., 2006. Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from "Cerro Matoso" Mine (Colombia). *Materials Characterization*, 57(1), pp.44–49.

Asimismo, con las arcillas se pueden fabricar artículos de la construcción tales como porcelanas, ladrillos, tejas, refractarios y abrasivos:

TABLA 4 Composición química principal de los productos cerámicos tradicionales más importantes

Producto	Composición química principal	Minerales y materias primas
Alfarería de mesa	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, SiO_2 , KAlSi_3O_8	Arcilla+silice+feldespatos
Porcelana	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, SiO_2 , KAlSi_3O_8	Arcilla+silice+feldespatos
Ladrillos y tejas	Al_2O_3 , SiC + piedra fina	Arcilla+silice y otros
Refractarios	Al_2O_3 , SiO_2 , otros como MgO , CaO	Alúmina y sílice
Abrasivos	SiC, Al_2O_3	Bauxita o alúmina Sílice y coque

Fuente:

https://www.google.es/search?biw=1024&bih=588&tbm=isch&sa=1&ei=2LqEWp3HBcOd5wL0lIWoda&q=SUPE RFICIE+ESPECIFICA+DE+LAS+ARCILLAS&oq=SUPE RFICIE+ESPECIFICA+DE+LAS+ARCILLAS&gs_l=psy-ab.3..0i24k1.5703.5703.0.6820.1.1.0.0.0.208.208.2-1.1.0....0...1c.2.64.psy-ab..0.1.207....0.Pv2q6A2y-0k

1.6 USOS DE LAS ARCILLAS

1.6.1 En ladrillos:

Su materia prima es la arcilla, la cual contiene principalmente feldespatos (grupo extenso de minerales compuestos por aluminio-silicatos de potasio, sodio y calcio).

Toda arcilla está compuesta principalmente por arcilla pura que es el aglutinante del conjunto del material y cuerpos que constituyen la mezcla a moldear. La arcilla pura está compuesta a su vez de un 47% de sílice, 39% de alúmina y un 14% de agua. La arcilla pura debe representar como mínimo un 25% del total del material componente de la mezcla. Cuando se desciende de este porcentaje, la plasticidad y el moldeo presentarán dificultad.

Se puede afirmar sin error que las arcillas que no contienen yeso ni cal se pueden utilizar en la fabricación de ladrillos, independientemente de la especialidad de este.

1.6.2 En Refractarios

Son materiales que resisten temperaturas de hasta 1500 grados centígrados,, sin perder su dureza y alterar su volumen apreciablemente, y la abrasion en caliente, con una baja conductividad.

Las propiedades de estas van en funcion de su composicion quimica y del tratamiento termico recibido, obteniendose asi refractarios de alta dureza, de alta, media y baja refractariedad.

1.6.3 En porcelana

El 50% es caolin, 30% es feldespato y el 20% es cuarzo,. Estos materiales deben ser de alta calidad y bien finos. Despues de la primera coccion llevada a cabo a 1200 grados centígrados, se esmalata para recibir otra coccion a 1500 grados centígrados. Son porcelanas si han recibido esta doble coccion.

Las piezas sanitarias estan hechas de porcelana vitrificada, semivitrificada o loza. De color blanco, poroso y absorbente, el cual se esmalta para impermeabilidad y dureza.

1.6.4 En Azulejos

Son piezas delgadas recubiertas por esmalte para la impermeabilidad y el desgaste. Las arcillas empleadas son ricas en cuarzo o caolin y en hierro. La composicion quimica de estos es semejante a la de las arcillas comunes, pudiendose hacer ajustes composicionales quimicos de acuerdo a los requerimientos especificos que se indiquen.

1.6.5 En vidrios

Las propiedades finales del vidrio estan dictaminadas por su metodo de fabricacion y por su composicion quimica. Esta ultima se representa en forma de porcentajes en peso de los oxidos mas estables a temperatura ambiente. Las composiciones quimicas de los vidrios sodicos mas usados se encuentran dentro de los limites que se muestran en la siguiente tabla:

TABLA 4 Intervalos de composición química frecuentes en los vidrios comunes

Componente	Desde ... %	... hasta %
SiO ₂	68,0	74,5
Al ₂ O ₃	0,0	4,0
Fe ₂ O ₃	0,0	0,45
CaO	9,0	14,0
MgO	0,0	4,0
Na ₂ O	10,0	16,0
K ₂ O	0,0	4,0
SO ₃	0,0	0,3

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Vidrio#Vidrios_comunes

Los contenidos en MgO, Fe₂O₃ y SO₃ son impurezas de la caliza, arena y el sulfato sódico, respectivamente. Pueden contenerse en los vidrios sin excesos, alterando algunas propiedades físicas, como las ópticas, ya que pueden cambiar levemente su coloración.

1.6.6 En cementos

El interés de incursionar de las escorias reductoras de ferroniquel en la industria constructora es relativamente reciente, ya que las composiciones químicas de las escorias ácidas y básicas son muy similares, excepto en que las básicas tienen mayor contenido de MgO y CaO, principalmente, lo que se podría solucionar ajustando sus composiciones porcentuales. Estas dos especies juegan un papel fundamental en los cementos y concretos.

La escoria debe tener una fase vítrea no mayor al 10%, aunque no limitativamente, ya que puede variar dependiendo del tipo de enfriamiento y el papel que la escoria va a desempeñar en el cemento. Varios autores afirman que debe contener mínimo un 50% de fase vítrea, otros dicen que no debe ser menor al 65%, mientras que otros informan que no importa mucho su proporción en la escoria, ya que fundamentalmente estas contienen silicatos hidratados de hierro, aluminio y

magnesio, los cuales son los componentes esenciales principales que debe tener un potencial candidato sustituto de algunas de las materias primas con las que se fabrican los cementos, por ejemplo, como lo seria el clinker.

Para la elaboracion de cementos Portland Siderurgicos, se sugiere emplear maximo el 30% de escorias, y un 70% para cementos siderurgicos. En la siguiente pagina se observa los intervalos porcentuales composicionales de la escoria a emplear en la fabricacion de cementos.

Los requerimientos de las materias primas fisicos y quimicos para la elaboracion de cementos y concretos son mas exigentes, pues sus solicitudes son mucho mayores a la de los materiales que se utilizarina en la fabricacion de ladrillo corriente, como las tejas, adoquines, ladrillos, refractarios, entre otros.

TABLA 5 Intervalos porcentuales composicionales de la escoria a emplear en la fabricacion de cementos

<i>ESPECIE QUIMICA</i>	<i>PORCENTAJE (%)</i>
SiO₂	28-38
Al₂O₃	9-18
CaO	35-48
MgO	2-10
FeO	0-12
MnO	0-2
S	1-3

Fuente: yanet, m.j., 2009. *evaluación de la escoria de ferroníquel como agregado fino para morteros de albañilería y acabados eber otoniel samayoa teret*

2. ESTADO DEL ARTE

En el año 2004, en la Universidad Simón Bolívar se caracterizó escorias de ferroníquel con el objetivo de encontrarles posibles usos industriales, para ello se les practicaron ensayos físicos como picnometría de polvos, permeabilidad de Blaine, porosimetría y tamizado. Igualmente se realizaron ensayos físicos como Difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Para las propiedades mecánicas se determinó el índice de trabajo de Bond, índice de abrasión, microdureza y resistencia al desgaste a abrasión.

Se determinó que estas escorias estaban conformadas fundamentalmente por SiO_2 , MgO y FeO , los cuales representan el 94,38% de la composición química. Además, están compuestas de manera minoritaria por Al_2O_3 , NiO , Cr_2O_3 , MnO , CaO , CoO y Cu_2O . Son de carácter ácido, densidad aparente de $2.95 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$, densidad de empaque es de $1.59 \pm 0.10 \text{ g/cm}^3$. La gravedad específica es de 2.96 ± 0.05 . La finura de Blaine para un porcentaje retenido en tamiz No.325 de 12%, es de $4145 \pm 22 \text{ cm}^2/\text{g}$, lo cual es superior a la finura de Blaine mínima requerida para cementos Portland siderúrgicos e inferior al valor máximo de finura de Blaine para cementos siderúrgicos.

A nivel mineralógico, las escorias de reducción se encuentran compuestas por dos fases: por forsterita (Mg , Fe) 2SiO_4 , con cantidades variables de Mg y Fe en su microestructura, y por espinelas inversas del tipo CrFe_2O_4 y Fe_3O_4 .

Las propiedades mecánicas de las escorias de reducción están caracterizadas por presentar una alta dureza ($866.9 \pm 19.8 \text{ kgf/mm}^2$ para la fase clara mayoritaria), una alta resistencia al desgaste por abrasión e impacto ($24.9 \pm 3.4\%$), una alta molturabilidad (índice de trabajo de Bond de $27.51 \pm 0.45 \text{ kW/ton}$ corta), una abrasividad superior a materiales abrasivos tales como SiC y SiO_2 , y fragilidad, propia de materiales cerámicos o templados. En general, estas escorias presentan propiedades mecánicas adecuadas, para el aprovechamiento de las mismas en capas de rodadura, bases y sub-bases de pavimentos, así como en la fabricación de materiales abrasivos. El aprovechamiento de estas escorias no es posible por no cumplir con los requerimientos técnicos, ambientales y financieros.¹²

En la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el año 2009, se evaluó una escoria de ferroníquel como agregado fino para concreto para determinar las ventajas y desventajas al emplearlas en cementos estructurales. Para esto, se caracterizaron química, física y mecánicamente, realizándoles ensayos como peso específico, granulometría, peso unitario, porcentaje de vacíos, porcentaje de absorción y composición química. Se concluyó que las escorias de ferroníquel eran compatibles

¹² Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28

con el concreto, siendo un material inocuo, que no tiene reacciones álcali-sílice dañinas al cemento. Estos concretos no poseen carbonatación, pudiéndose usar como concreto estructural, por lo que se determinó también la dosificación en la fabricación de estos. También sugieren el estudio de estas escorias para la posible fabricación de otros productos de construcción.¹³

Más recientemente, en el año 2014, un artículo presentado por el doctor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Dr. Héctor Abril, en el marco del V Congreso Internacional de Ingeniería Civil, en Universidad Santo Tomás Seccional Tunja, buscó la optimización de las escorias negras en pavimentos, y su utilización productos de construcción. De esta investigación se pudo concluir que las escorias negras vienen siendo usadas en carreteras desde 1956 en casos específicos sin haber profundizado en dicha época más allá del uso específico que le dieron en su estudio técnico. Muchas de estas escorias negras pueden tener algo de potencial expansivo lo que debe llevar a quienes las usen a generar procesos para el control de la misma, ya que de no hacerlo esto sería desfavorable para el caso de la estabilidad de suelos y estructuras de pavimentos.¹⁴

En la mayoría de los estudios revisados se pudo observar que las escorias negras poseen buenas propiedades de resistencia al desgaste por abrasión (inferior al 35%) y CBR superiores al 100%. La posibilidad de uso de escorias negras de horno de arco eléctrico se da para incluirlo en capas granulares mezclado, solo en algunos casos y para capas asfálticas e inclusive mezclas de concreto hidráulico para pavimentos. En algunos estudios revisados se pudo evidenciar que la escoria cumple con la normativa estipulada para usarlas en mezclas asfálticas y que los resultados de expansión no superan el 1% después de los 7 días de inmersión. Países como Brasil, España y Chile han sido, algunos de los países que más han estudiado y usado las escorias negras de horno de arco eléctrico.¹⁵

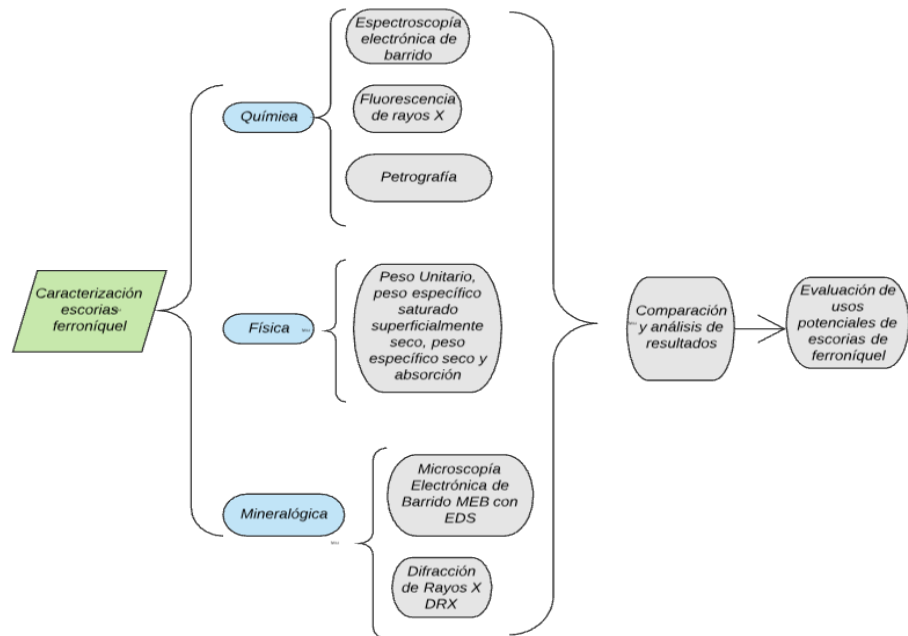
¹³ Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28.

¹⁴ arvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. , p.135.

¹⁵ Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.

3. METODOLOGÍA

Imagen 2 Flujómetro procedimiento metodológico



Fuente: el autor

Las muestras de escorias caracterizadas son resultado del proceso de fusión en horno eléctrico de arco de minerales lateríticos de bajo tenor previamente calcinados en horno rotatorio, del departamento de Córdoba. Del proceso de fusión se toman 5 kilos de escoria, y se le practica el respectivo cuarteo, según norma ASTM C 125.

Es de importancia indicar que las escorias analizadas son provenientes del proceso de fusión de minerales lateríticos de bajo tenor llevado a cabo en el horno eléctrico de arco en las instalaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, sede Tunja. Se realiza la caracterización química, física y mineralógica de las escorias de ferromanganeso, con el fin de determinar sus propiedades principales, analizarlas, contrastarlas, y en función a estas poder sugerir potenciales usos industriales. Para esto se hizo uso de los equipos de la Uptc y de la Universidad Nacional de Colombia.

Las características químicas y físicas de las escorias son las que determinan el grado de idoneidad de estas en su implementación como sustituto parcial de algunas materias primas en la fabricación de productos industriales.

Para la caracterización **química**, se hizo uso del Espectrómetro de Absorción Atómica, el Espectrómetro de Fluorescencia de rayos X y el Microscopio de Petrografía. Estos

ensayos permitieron la determinación de los principales elementos químicos tales como: Si, Al, Ca, Ni, Fe y Mg. Los resultados hallados son congruentes con las composiciones mineralógicas de las escorias en estudio.

La caracterización **física** se halló bajo la norma *ASTM C-128-97*, para hallar la densidad promedio y la densidad relativa o gravedad específica y absorción. Estas propiedades son determinadas a los materiales gruesos y finos en calidad de materia prima, de pavimentos, asfaltos, cementos, concretos y adoquines, entre otros, para contrastarlo con la norma vigente ASTM, y sugerir la idoneidad o no de estas escorias en la industria de la construcción.

La morfología de las partículas tiene gran influencia en las propiedades de un mortero tanto en estado fresco como en estado endurecido, y por eso es interesante este ensayo. El estudio morfológico es representativo en la medida en que puedan ser determinadas algunas características como la dimensión o tamaño del grano, la redondez y esfericidad, la textura, el color y el brillo. La identificación de estas características permite determinar si un agregado es adecuado para un uso específico.

La esfericidad relaciona la forma del grano con una esfera de igual volumen y a pesar de que esta característica es determinada cualitativamente, sirve para clasificar los granos angulosos y redondeados en alto y bajo grado de esfericidad, conforme se aproxime o no a la forma esférica. El redondeamiento describe la suavidad de los contornos y su grado de curvatura. La forma y textura superficial de las partículas influyen considerablemente en las propiedades del mortero. Las partículas con mayor textura áspera, angulosas y alargadas, requieren más pasta de cemento y mayor cantidad agua para producir un mortero más trabajable. Análogamente, la distribución del tamaño de las partículas afecta el comportamiento del mortero: las arenas gruesas aumentan su resistencia a compresión pero reducen la trabajabilidad, mientras que las arenas finas, aunque produzcan morteros trabajables, reducen su resistencia y adhesión.

La caracterización **mineralógica** se realizó con DRX y se corrobora con Petrografía, y para la identificación morfológica se utilizó Microscopía Electrónica de Barrido identificando su morfología superficial en las escorias, respectivamente. En estos ensayos se puede evidenciar el grado de cristalización de la escoria debido al enfriamiento lento al que fue sometida.

4. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE FERRONÍQUEL

Antes de iniciar con la caracterización, se ha tenido en cuenta previamente la selección de las muestras, laboratorios donde se practicarían las pruebas, el costo y el tiempo para desarrollarlos. Los resultados arrojados son de suma importancia para determinar si es posible su aprovechamiento industrial.

Estas escorias son llevadas a molienda hasta llevarla a malla #100 y #200 (150 y 75 μ , respectivamente).

Imagen 3 Muestras de ensayo escorias de ferroníquel a malla #100.



Fuente: el autor

- Equipos y procedimientos experimentales.

La caracterización de las escorias de ferroníquel se evalúa por medio de diferentes técnicas, que juzgarán el desarrollo y el éxito de la investigación. A continuación, se presentan los principios físicos y las técnicas de los instrumentos empleados en la caracterización de los materiales:

4.1 Análisis químico

4.1.1 Espectroscopia de absorción atómica.

En química analítica, la espectrometría de absorción atómica es una técnica para determinar la concentración de un elemento metálico determinado en una muestra. Puede utilizarse para analizar la concentración de más de 62 metales diferentes en una solución. Los electrones de los átomos en el atomizador pueden ser promovidos a orbitales más altos por un instante mediante la absorción de una cantidad de energía (es decir, luz de una determinada longitud de onda). Esta cantidad de energía (o longitud de onda) se refiere específicamente a una transición de electrones en un elemento particular, y en general, cada longitud de onda corresponde a un solo elemento.

Como la cantidad de energía que se pone en la llama es conocida, y la cantidad restante en el otro lado (el detector) se puede medir, es posible, a partir de la ley de Beer-Lambert, calcular cuántas de estas transiciones tiene lugar, y así obtener una señal que es proporcional a la concentración del elemento que se mide.

Se determinaron la concentración de los seis elementos de interés, a saber: Al, Si, Ca, Ni, Fe y Mg: los tres primeros se halló su concentración en los laboratorios de la UPTC, mientras que el resto en los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, ya que no se disponía de óxido nitroso para tal fin.

4.1.2 Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

La Espectroscopía de Fluorescencia de Rayos X (FRX) es una buena herramienta para identificar compuestos relacionados con la naturaleza de los materiales arcillosos, Clínker y cemento. El proceso consistió someter tres muestras de escoria de ferroníquel al espectrómetro de fluorescencia de rayos X, y determinar su estructura electrónica y su composición química. Con los resultados de análisis químicos se realizó la evaluación de unos requisitos básicos para el uso de escorias como adición activa en el cemento Portland, y como sustituto parcial de las arcillas en la fabricación de otros materiales cerámicos, como el índice de basicidad y de hidraulicidad.

Este ensayo se complementa con la Espectroscopía de Absorción Atómica, para tener mayor certeza y mayor precisión en la lectura de composición química, por elementos, y con base en estos resultados poder proseguir con los objetivos trazados en el presente trabajo de investigación.

El espectrómetro de fluorescencia de rayos X que se usó se aprecia en la siguiente imagen:



Imagen 4 Espectrómetro de fluorescencia de rayos X. Fuente: el autor

4.1.3 Petrografía

La **Petrografía** es un campo de la petrología que se ocupa de la descripción y clasificación de las rocas mediante la observación microscópica de secciones o *láminas delgadas* derivadas de las rocas en estudio, en un *microscopio petrográfico*, clasificándolas según su textura y composición mineralógica. Este tipo de análisis revela una serie de características y/o propiedades evaluables en los cristales y la relación que existen entre ellos, lo que va a ayudar a determinar la composición de la roca centrándose principalmente en la naturaleza y origen de la misma.

Del gran conjunto de minerales conocidos en la naturaleza sólo un grupo reducido de unos cincuenta, denominados petrogénicos o petrográficos, desempeñan un papel fundamental en la formación de las rocas; los principales son: silicatos –componentes más importantes, carbonatos, sulfatos, sulfuros, cloruros, fosfatos, óxidos e hidróxidos. En nuestro caso, nos centraremos únicamente en los silicatos, puesto que son estos los constituyentes principales de las escorias.

4.2 Análisis físico

4.2.1 Densidad promedio, densidad relativa y absorción.

Las normas ASTM e INVIAS describen el procedimiento para determinar la densidad promedio y la densidad relativa, así como su absorción.

En este ensayo se determinaran la **densidad promedio** de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), la **densidad relativa (gravedad específica)** y la **absorción del agregado fino**. Dependiendo del procedimiento utilizado, la densidad, en kg/m³ (lb/pie³), se expresa como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS) o aparente. Además, la densidad relativa (gravedad específica), que es una cantidad adimensional, se expresa como seca al horno (SH), saturada y superficialmente seca (SSS) o aparente (gravedad específica aparente). La densidad seca al horno (SH) y la densidad relativa seca al horno (SH) se deben determinar luego del secado del agregado. La densidad SH, la densidad relativa SSS y la absorción se determinan luego de sumergir el agregado en agua durante un período especificado.

El ensayo descrito en esta norma se usa para determinar la densidad de la porción esencialmente sólida de un gran número de partículas de agregado y suministra el valor promedio que representa la muestra..

El **método** consiste en sumergir en agua una muestra del agregado durante un período de 24 horas, para llenar sus poros permeables. Una vez retiradas del agua, las partículas del agregado se secan superficialmente y se determina su masa. Posteriormente, la muestra(o una parte de ella) se coloca en un recipiente graduado y se determina su volumen por el método gravimétrico o el volumétrico. Finalmente, la muestra se seca al horno y se determina su masa seca. Usando los valores de masa obtenidos y las fórmulas incluidas en esta norma, es posible calcular la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado.

4.3 Análisis mineralógico

4.3.1 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Es una de las técnicas más versátiles para la visualización y el análisis de las características micro estructurales de muestras sólidas, debido, principalmente, a su elevada resolución (alrededor de 20 Å) y a su gran profundidad de campo, lo que permite una visualización tridimensional. Un microscopio electrónico de barrido crea una imagen ampliada de la superficie de un objeto. El SEM o MEB explora la superficie de la imagen punto por punto y permite apreciar la topografía del material. EL equipo de microscopía fue un SEM de marca ZEISS, de fabricación alemana, con acople de EDS (acrónimo de espectroscopia de rayos x), el cual realiza un análisis químico elemental puntual en puntos definidos a través de la imágenes obtenidas con el SEM, pues están adjuntos a los equipos de columnas de electrones. Cuando los átomos de un material son ionizados por una radiación de alta energía emiten rayos x característicos para cada elemento.

En la Microscopía Electrónica de Barrido se utilizó un equipo Carl Zeiss, de fabricación alemana, de referencia EVOMA 10, el cual usa los tres tipos de rayos, los cuales son los dispersos, retrodispersos y los secundarios:

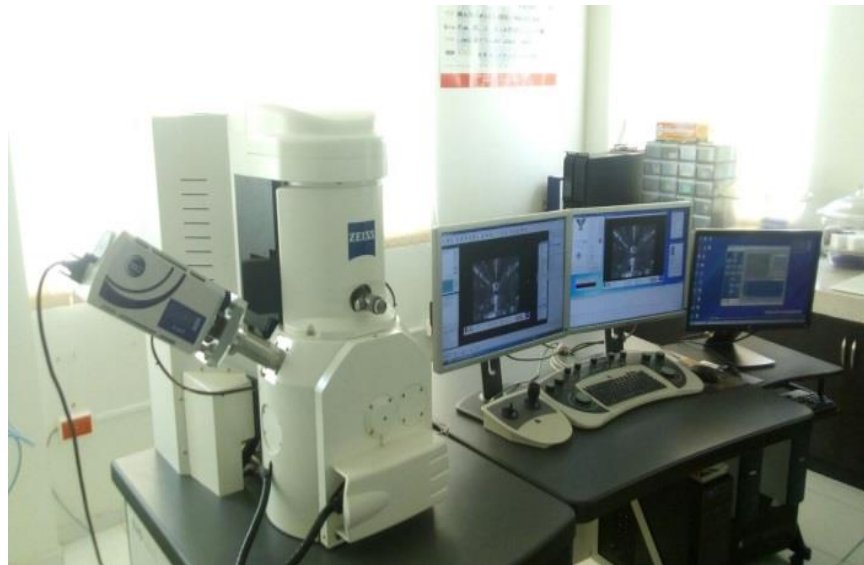


Imagen 5 Microscopio Electrónico de Barrido. Fuente: el autor.

4.3.2 Difracción de rayos X.

Para este ensayo se utilizó un equipo Analytical de referencia Minipalm 2. Este equipo trabaja por energías dispersivas utilizando como emisor un tubo de Rodio. Los resultados se obtuvieron bajo el tipo de medida Standard Less, de lectura semicuantitativa, ya que no se realizó curva de calibración. La lectura obtenida no tiene entonces la misma precisión, pero su variación se puede considerar despreciable para los objetivos del presente trabajo de investigación.

El espectrómetro de rayos X posee las siguientes características:

- Generador de Rx con tubo empíreo de cobalto para la detección de ángulos.
- Detector pix-cel d1 de gran capacidad con rejilla variable.
- Goniómetro con geometría (configuración geométrica (Bragg-Brentano θ - θ)).
- Muestra en polvo 2θ : 10° - 80°
- Velocidad de barrido: 0.5 segundos por paso
- Análisis por medio del programa X'pert High Score plus, tomando como referente los patrones de difracción del **Inorganic Crystal Structure Database (ICSD)**

En la siguiente imagen se tiene el Difractómetro de rayos X utilizado en la prueba.



Imagen 6 Difractómetro de rayos X. Fuente: el autor.

La aplicación más importante de la técnica es la identificación de fases cristalinas presentes en la muestra sólida o de polvo, tanto en su aspecto cualitativo como cuantitativo. Tiene varias aplicaciones:

- Conocer la forma y distribución de los átomos en un cristal.
- Conocer el tipo de combinación química de una sustancia.
- Calcular el coeficiente de absorción de una sustancia para una radiación dada.
- Conocer la composición mineralógica cuantitativa, semicuantitativa y cualitativa de una muestra.

Las características obtenidas en este ensayo permiten encontrar similitudes o diferencias mineralógicas con las arcillas, materiales naturales usados en la construcción, y con otras escorias de ferroníquel que también se les haya practicado difracción de rayos X. Con base en esta caracterización, se hacen sugerencias de uso en la fabricación de productos industriales.

La caracterización mineralógica se realizó a una (1) muestra, con un peso aproximado de dieciocho gramos (18 g), muestra suficiente para realizar el análisis, la misma presenta un tamaño de artefacto muy fino (V) con una clasificación de forma semi-redondeada (S), el color reflejado por la muestra está asociado al código de color GREY 6/5PB según tablas de Munsell y no presenta cambios abruptos en su color

Para la preparación de muestra en polvo, 5g de muestra fueron pulverizados hasta alcanzar tamaños menores a $44\mu\text{m}$ (Sieve # 200). A la muestras se le realizaron pruebas de efervescencia y campos magnéticos, donde el compuesto demostró tener una naturaleza es no calcárea (NC) y no magnética la prueba que consiste en depositar una pequeña cantidad de la muestra representativa sobre un vidrio, apoyado sobre un imán, si el material presenta propiedades ferromagnéticas se generarán líneas de campo y atracción magnética del material hacia el imán, finalmente, La presencia de carbonatos se establece a través de la adición al suelo de gotas de HCl (ácido clorhídrico) al 10-por ciento. El grado de efervescencia del gas de dióxido de carbono es indicativo de la cantidad de carbonato.

5. RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Esta caracterización hecha a las escorias de ferroníquel, hace posible determinar sus diversas propiedades, las cuales permiten evaluar la factibilidad de uso en la industria. Primero, se presentan los resultados de los diferentes ensayos, y enseguida se evalúa la factibilidad de uso en diferentes productos.

Para un análisis más metódico, se presentan los resultados de cada uno de los métodos practicados, se realiza discusión sobre cada uno de ellos, particularidades, similitudes, diferencias y correlaciones. Una vez hecho esto, se toman los resultados de cada uno de los ensayos realizados y se analizan del mismo modo con las características químicas y físicas de algunos materiales de construcción, para de esta forma poder sugerir los potenciales usos que las escorias en estudio pudieran tener en la industria.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS ESCORIAS DE FERRONÍQUEL

En la caracterización se evalúan sus propiedades químicas, físicas y mineralógicas. Estos resultados obtenidos sirven no solamente para la empresa, debido a que permite tener un rango de valores de la propiedad evaluada, sino que además sirve también para poder sugerir un uso determinado en la industria de la construcción.

5.1.1 Propiedades químicas

Se determinó la composición química y su basicidad. La composición química en el FRX es obtenida en términos de elementos y óxidos. La composición química es en gran parte lo que puede determinar su utilización en diferentes usos industriales, en calidad de sustituto parcial en la fabricación de elementos

5.1.1.1 Composición química por FRX

Se determinó la composición química de las escorias de ferroníquel por óxidos, determinándose el Na_2O , MgO , Al_2O_3 , SiO_2 , SO_3 , K_2O , CaO , TiO_2 , Cr_2O_3 , MnO , Fe_2O_3 , NiO y CuO , y por elementos, hallando el Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni y Cu.

Ambas lecturas, por elementos y por óxidos, se hacen necesarias para un mejor cotejo de resultados, y para comparación química por óxidos, de las materias primas que habrá de reemplazar parcialmente algunas materias primas para la fabricación de productos industriales.

En la siguiente tabla se muestra la composición química de las escorias de ferroníquel, por el método de Fluorescencia de Rayos X, por óxidos y por elementos.

Tabla 6 Composición química de las escorias de ferroníquel, por el método de Fluorescencia de rayos X. por elementos y por óxidos.

Óxidos, en %	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	FeO	NiO	CuO
muestra 1	7,1	15	5,1	57	0,5	0,1	1	0,12	1,32	0,98	11,7	0,2	0,1
muestra 2	7,7	12	4,5	45	0,4	0,1	0,8	0,1	1,96	1,17	25,9	0,3	0,1
elementos, en %	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu
muestra 1	5,26	9	2,7	26,6	0,2	0,08	0,71	0,07	0,9	0,76	9,1	0,16	0,09
muestra 2	5,71	7,23	2,38	22,1	0,16	0,08	0,57	0,06	1,34	0,9	20	0,23	0,09

Fuente. El autor.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que para la obtención de estos resultados no se realizó la curva de calibración, por lo que este ensayo es semicuantitativo, y no cuantitativo como podría esperarse. Los resultados así obtenidos no son muy alejados de los reales. Sin embargo, se presenta una particularidad con el Na₂O y el K₂O: estos aparentemente se encuentran en una proporción tal que bajarían el punto de fusión de la escoria a casi a la mitad del que debe tener. Lo que sucede es que el sodio, el potasio y el magnesio pertenecen a las familias alcalinas y alcalinoterreas, con propiedades químicas y electrónicas muy similares, a tal punto que el espectrómetro puede “equivocarse” por el traslape de los espectros emitidos y confundirse. En la siguiente imagen se puede apreciar la similitud en la tabla periódica de estos elementos:

Imagen 6 Segmento tabla periódica. Fuente: el autor

GRUPO		TABLA PERIÓDICA									
PERIODO	1	2									
1	1 1.0079 H HIDRÓGENO										
2	3 6.941 Li LITIO	4 9.0122 Be BERILIO									
3	11 22.990 Na SODIO	12 24.305 Mg MAGNESIO									
4	19 39.098 K POTASIO	20 40.078 Ca CALCIO	21 44.956 Sc ESCANDIO	22 47.867 Ti TITANIO	23 50.942 V VANADIO	24 51.996 Cr CROMO	25 52.004 Mn MANGANESO	26 55.939 Fe HIERRO	27 58.933 Co COBALTO	28 58.933 Ni NÍQUEL	29 58.933 Cu COBRE

MASA ATÓMICA RELATIVA (I)

GRUPO IUPAC

GRUPO CAS

NÚMERO ATÓMICO

SÍMBOLO

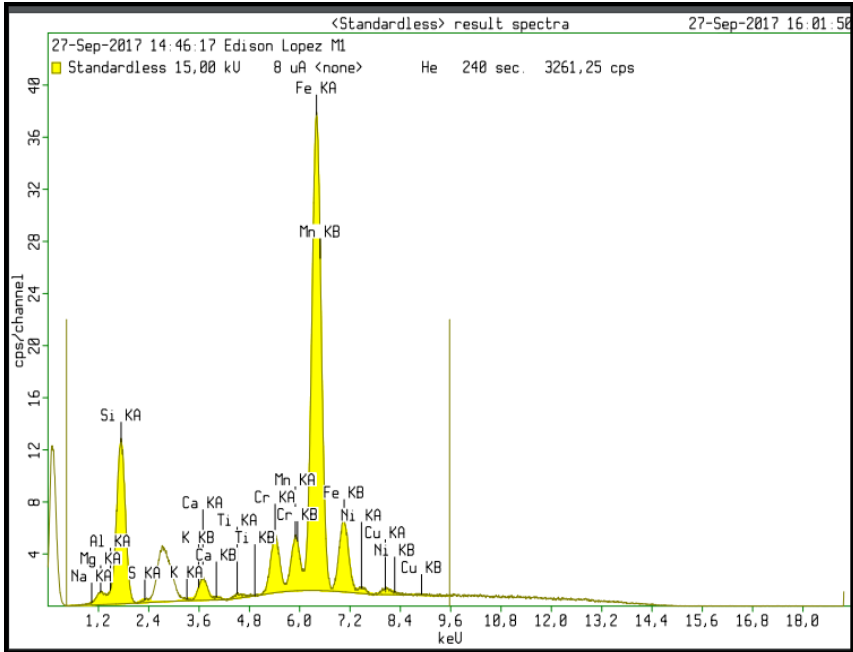
NOMBRE DEL ELEMENTO

B

BORO

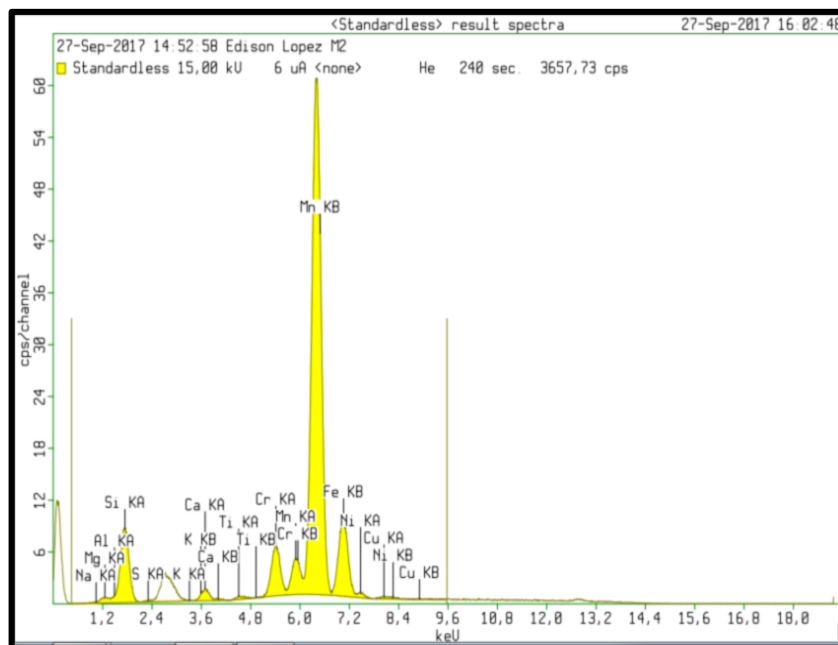
En las siguientes imágenes se observan los espectros arrojados en la espectroscopia de fluorescencia de rayos X:

Imagen 7 Espectro de fluorescencia muestra #1.



Fuente: el autor.

Imagen 8 Espectro de fluorescencia muestra #2.

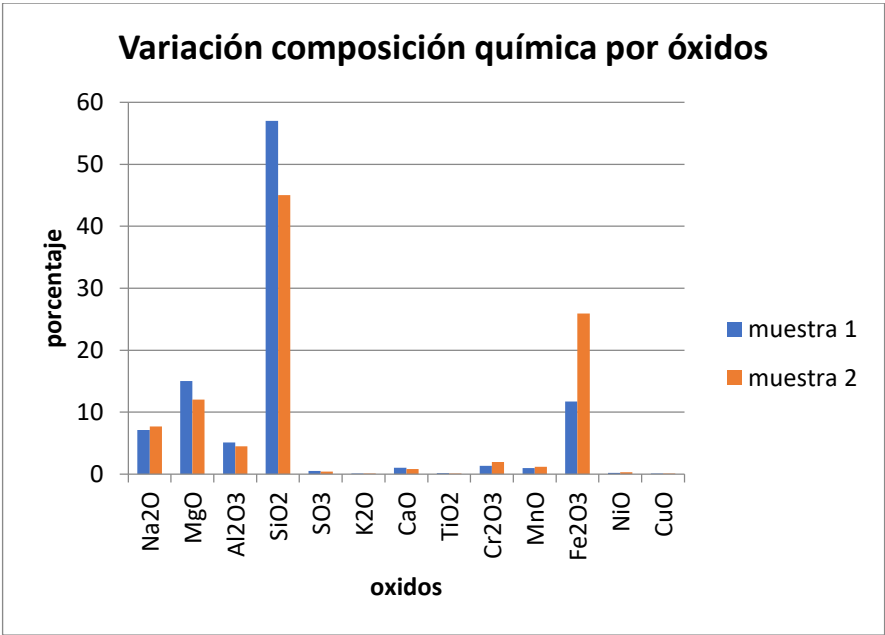


Fuente: el autor

Los anteriores gráficos muestran que el magnesio y el sodio junto con el potasio presentan picos muy similares, de mínima intensidad, lo que permite suponer que la lectura dada del óxido de sodio en realidad pertenece, por lo menos en su mayoría, a óxido de magnesio, alcanzando así un valor de óxido de magnesio más acercado al del promedio de las escorias de ferromnquel de Colombia.

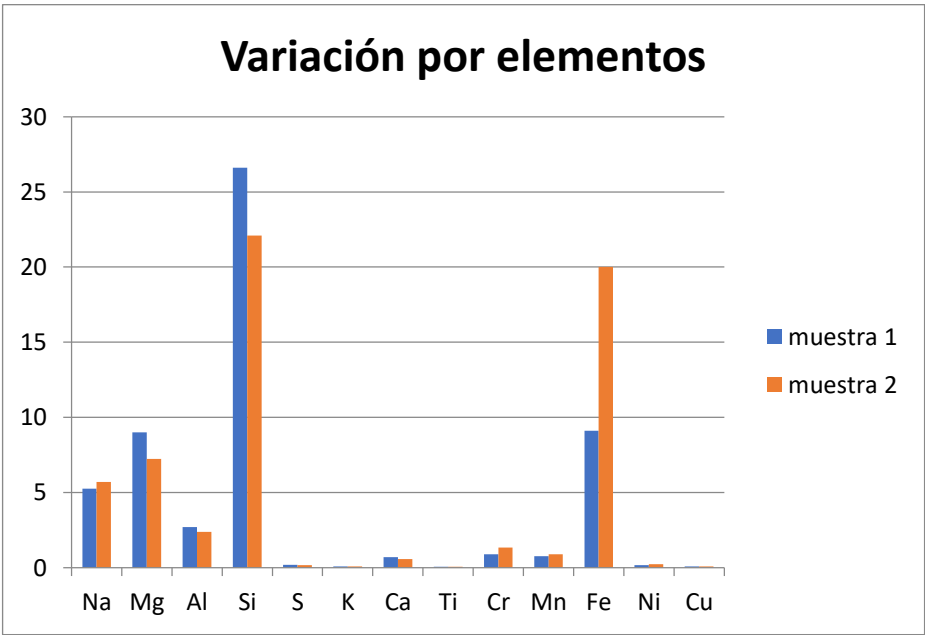
De los datos de la tabla 6 se obtiene el gráfico 1, en donde se observa que los óxidos que presentan una mayor variabilidad son el SiO_2 , el Fe_2O_3 y el MgO , principalmente, mientras que los demás óxidos no varían significativamente entre sí, mientras que en el grafico 2 se presenta la variación por elementos, manteniéndose una proporcionalidad entre sus componentes. Esta congruencia le da mayor solidez a los resultados obtenidos. Para esto se realizaron los cálculos estequiométricos de cada uno de los componentes, encontrándose correspondencia entre los valores hallados por los equipos. De esta manera, se comprueba la precisión de las lecturas emitidas por el espectrómetro de fluorescencia de Rayos X.

Gráfico 1 Variación composición química por óxidos.



Fuente: el autor

Gráfico 2 Variación composición química por elementos.



Fuente: el autor

5.1.1.2 Composición química por espectroscopia de absorción atómica.

En la espectroscopia de Absorción Atómica se obtuvo lectura de seis elementos químicos principales, los cuales se muestran a continuación:

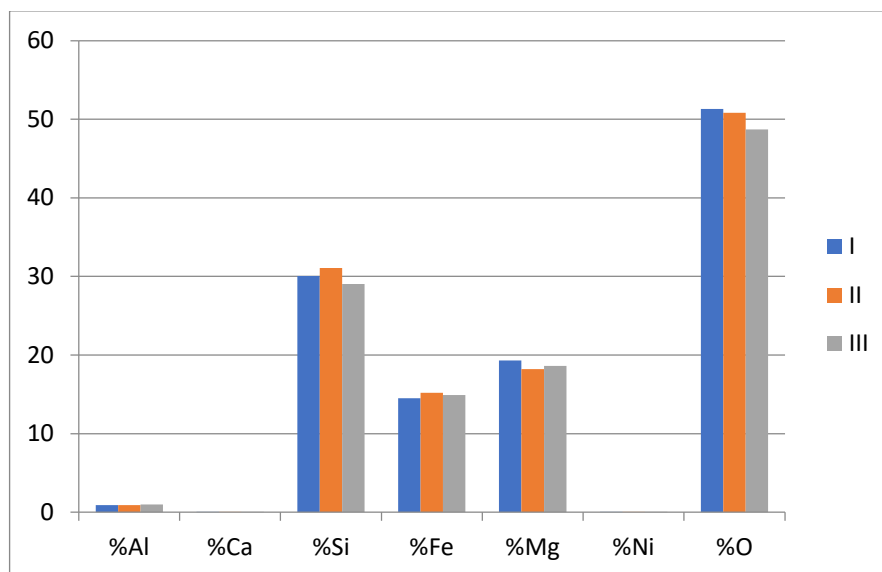
Tabla 7 Composición química porcentual por espectrómetro de absorción atómica.

Muestra	%Al	%Ca	%Si	%Fe	%Mg	%Ni	%O
I	0,91	0,015	30,05	14,5	19,3	0,015	51,3
II	0,92	0,02	31,08	15,2	18,2	0,045	50,8
III	0,98	0,017	29,03	14,9	18,6	0,07	48,7

Fuente: el autor

Aquí es importante indicar que los elementos examinados en esta muestra fueron 6, y que no son los únicos que se encuentran presentes en ésta, pues el oxígeno, tras realizar los respectivos cálculos estequiométricos de los óxidos que se espera que se encuentren en la muestra, se presentan en un porcentaje pasando del 50%, lo que significa que los valores obtenidos por el espectrómetro de absorción atómica son en realidad la mitad de los reales, aproximadamente. O expresado de otra forma, esos porcentajes arrojados representan los porcentajes de esos elementos del 50% de la muestra total, pues el otro 50% pertenecerá al Oxígeno, como lo demostró el análisis estequiométricos.

Grafico 3 composición química por elemento de escorias de ferroníquel, con espectrómetro de absorción atómica.



Fuente: el autor.

La grafica obtenida muestra la presencia mayoritaria de silicio, hierro y de magnesio, que son la mayoría del total de la masa de la muestra, y de unas pequeñas cantidades de aluminio, calcio, hierro y níquel.

Las escorias, como ya se mencionó, fueran enfriadas a temperatura ambiente. En este enfriamiento lento se presenta el fenómeno de cristalización, sin querer con eso decir que la escoria sea cristalina: al enfriarse las escorias lentamente, se permite que algunas especies cristalinas empiecen a formarse, pero su grado de cristalización, aunque se presenta en toda la masa, no es significativo, es decir, la conformación de grandes redes cristalinas no se presenta, solo son nucleaciones cristalinas de corto alcance, por lo que a pesar de este hecho, se siguen considerando escorias amorfas, lo cual es inherente de cualquier tipo de escoria, pues es su naturaleza.

5.1.1.3 Petrografía

Para la realización de este ensayo, se hizo preparación de la muestra, mediante homogenización, división y reducción a granulometrías menores a malla 20 (0.85 mm), elaboración de probeta con resina epóxica y sección delgada, a 30 μm de espesor.

La composición fue establecida mediante conteo de 500 puntos por microscopia óptica con luz transmitida con polarizadores paralelos y cruzados.

En esta petrografía se encontró:

- Ortopiroxeno: variedad Enstatita-Ferrosilite. Habito tabular, astilloso, exfoliación en planos a 90°. Color pardo neutro, no presenta pleocroísmo. Relieve fuerte positivo, birrefringencia de segundo orden.
- Clinopiroxeno: variedad Augita. Habito prismático, incoloro, neutro exfoliación en planos a 90°. Extinción inclinada mayor de 20°. Birrefringencia fuerte de segundo orden.
- Olivino: habito prismático. No presenta exfoliación. Birrefringencia fuerte de segundo orden. Incoloro a verde claro.

En la siguiente tabla se tienen las especies mineralógicas encontradas en las muestras de escoria de ferroníquel:

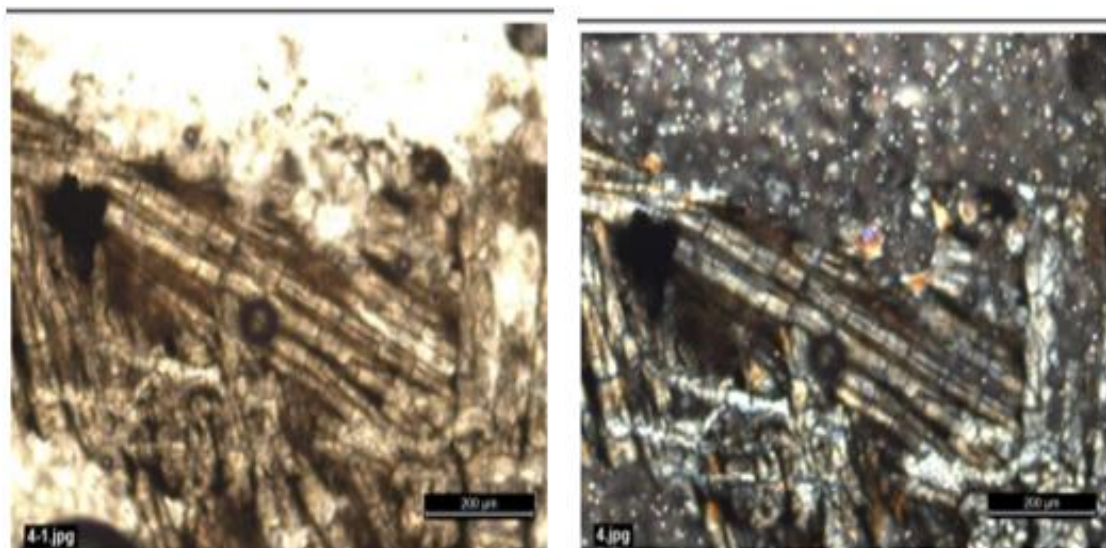
Tabla 8 Especies mineralógicas encontradas en las muestras de escoria de ferroníquel.

Componentes		Volumen en %	Forma	Tamaño
Fase Amorfa	Opacos	5.0	amorfa	amorfo
	Vítrea	2.0	amorfa	amorfo
Fase Cristalina	Ortopiroxeno-Enstatita-Ferrosilita	62.0	subhedral	Menor a 850μ
	Clinopiroxeno	17.0	anhedral	Menor a 500 μ
	Olivino	14.0	anhedral	Menor a 500 μ
Total		100.0		

Fuente: el autor

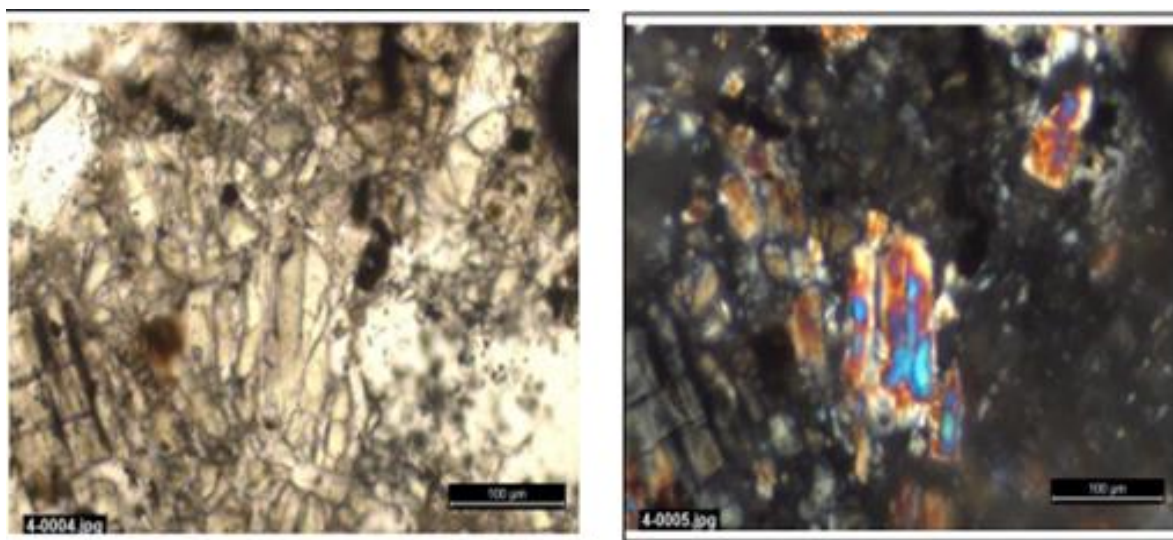
Las micrografías que se presentan a continuación muestran una morfología de las escorias de ferroníquel, en las que se aprecian las fases cristalinas encontradas.

Imagen 9 Imágenes con 20x. Izq: polarizadores paralelos. Der: polarizadores cruzados. Mineral tabular (astilloso), exfoliación a 90°, Enstatite-Ferrosilite.



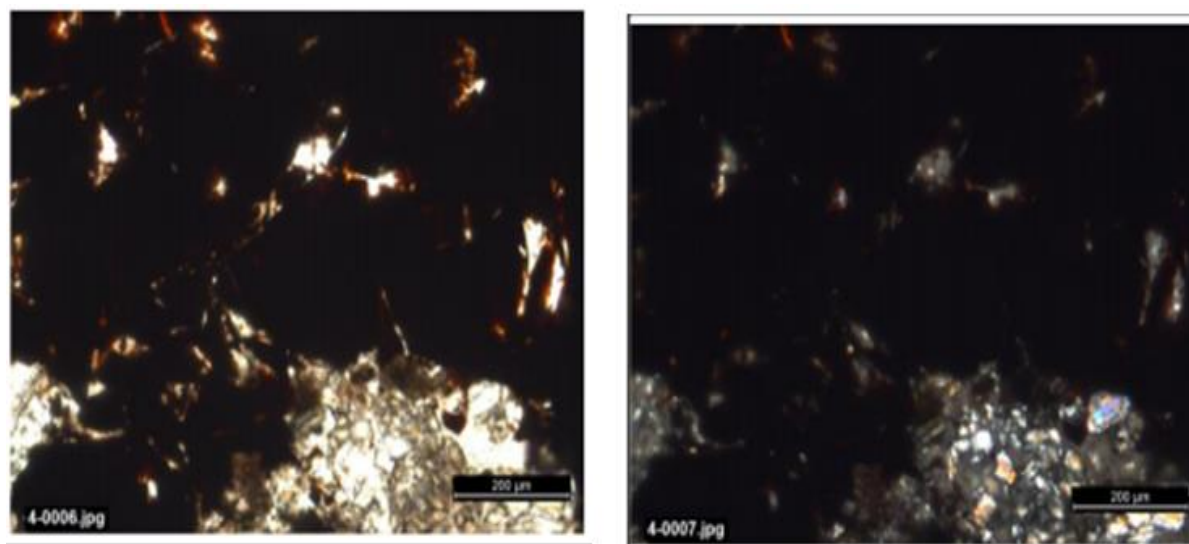
Fuente: el autor

Imagen 10 Imágenes con 10x. Izquierda: polarizadores paralelos. Derecha: polarizadores cruzados. Mineral prismático, fracturado, Olivino.



Fuente: el autor.

Imagen 11 Imágenes con 20x. Izquierda: polarizadores paralelos. Derecha: óxidos de hierro, material opaco, amorfo.



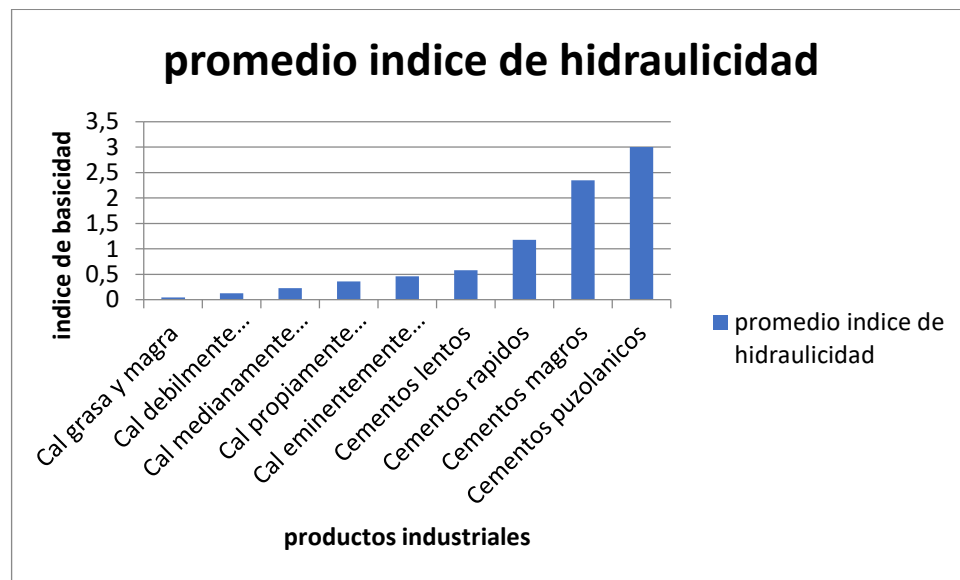
Fuente: el autor.

Las micrográficas muestran una sección de la lámina delgada de lo que sería un milímetro cuadrado de área.

Se tiene entonces que la fase mayoritaria, que es del 62%, corresponde a la familia de los ortopiroxenos, de habito astilloso y tabular, representándolo la enstatite-ferrosilite, mientras que el 17% corresponde a los clinopiroxenos, de habito prismático, representándolo la Pigeonita.

Hidraulicidad: el índice de hidraulicidad es un indicador de la aptitud de los áridos a los efectos de la hidratación en la fabricación de cementos y concretos. A continuación se tiene una gráfica en donde se aprecia el índice de hidraulicidad de algunas materias primas y de algunos productos industriales, para posterior contraste:

Grafico 5 promedio índice de hidraulicidad de algunos productos industriales.



Fuente: el autor.

La biografia dice que con un indice de hidraulicidad superior a 1 sugiere aptitudes para su uso parcial de materias primas en la fabricacion de productos ceramicos en general. Se realiza entonces el calculo matematico para tal determinacion:

$$[(\text{CaO}+\text{MgO}+\text{Al}_2\text{O}_3) / (\text{SiO}_2+2/3 \text{ Al}_2\text{O}_3)]>1$$

$$\text{Entonces: } [(0,97+15+5,1) / (56,8+2/3 \cdot 5,1)]=0,29$$

Para el caso de los cementos, estas escorias de ferroníquel no presentan aptitud de hidraulicidad teórica aceptable para la fabricación de cementos lentos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que las propiedades hidraulicas de este tipo de escorias se adquieren en el temple, temple que no recibieran las escorias en cuestion. Este índice en este caso se obtiene para corroborar la carencia de hidraulicidad debido al enfriamiento lento que tuvieron estas escorias. De cualquier forma, es posible aumentar el índice de hidraulicidad aumentando la cantidad de CaO mediante adiciones en frio de cal viva o de mezclas diseñadas con otros componentes.

Haciendo el calculo matemático, se tiene que para lograr una hidraulicidad mínima para ser empleadas las escorias de ferroníquel debe tener una cantidad mínima de óxidos básicos del 49,52%. Para índices de hidraulicidad mayores, se tendría que aumetar de determinada forma la cantidad de CaO.

5.1.2 Propiedades Físicas

5.1.2.1 Basicidad

Como ya se mencionó, la basicidad es la relación existente entre óxidos ácidos y óxidos básicos. Para este caso, se tiene en cuenta la siguiente formula, ya que, aunque existen otras fórmulas matemáticas, la escogida aquí se debe a que es más representativa, ya que, como en el caso del índice de hidraulicidad, incluye los óxidos más representativos a la hora de realizar el cálculo matemático:

$$[(\text{CaO}+\text{MgO})/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)],$$

$$[(0,97+15)/56,8+1,7)] = 0,27$$

Aquí el valor numerico de la basicidad debe ser minimo de 1.1 para que pueda ser empleada tanto en cementos como en los demas cerámicos mencionados anteriormente. De igual forma, al hacerse del mismo modo el ajuste composicional quimico se logra obtener una basicidad minima aceptable. Se puede emplear el mismo valor numerico que representa la cantidad de oxidos basicos ideal en el cálculo del indice de hidraulicidad:

$$[(49,5+15)/56,8+1,7)] = 1,1$$

Con este ajuste en la cantidad de óxidos básicos presentes, se obtiene una basicidad de 1,1, valor mínimo de basicidad para poder ser eventualmente sustituto parcial en la fabricación de algunos productos industriales, como lo son los cerámicos.

5.1.1.2 Peso Unitario, Peso Específico Saturado Superficialmente y Peso Específico Seco.

Para la determinación de estos coeficientes ya se ha mencionado el procedimiento, y una vez realizado se obtienen los siguientes resultados, consignados en la siguiente tabla:

Tabla 9 Variación propiedades físicas de agregados.

Material	Peso Unitario	Peso específico saturado superficialmente seco	Peso específico seco	% Absorción
Muestra #1	1,36	2,63	2,77	1,37
Muestra #2	1,39	2,81	2,81	1,40
Muestra #3	1,27	2,84	3,05	1,37
Promedio	1,34	2,76	2,9	1,38

Fuente: el autor

Para este ensayo se hizo uso de las tres muestras de escorias molidas a malla #100, o sea, a 150µm. para estos valores se aceptan una desviación de máximo 0.82, según la norma INVIAS, por lo que estos resultados obtenidos son aceptables.

5.1.3 Propiedades estructurales y morfológicas

5.1.3.1 Microscopia Electrónica de Barrido: las micrografías obtenidas producto de la Microscopia Electrónica de Barrido fueron realizadas a las muestras de escorias de ferróníquel #1, #2 y #3, respectivamente.

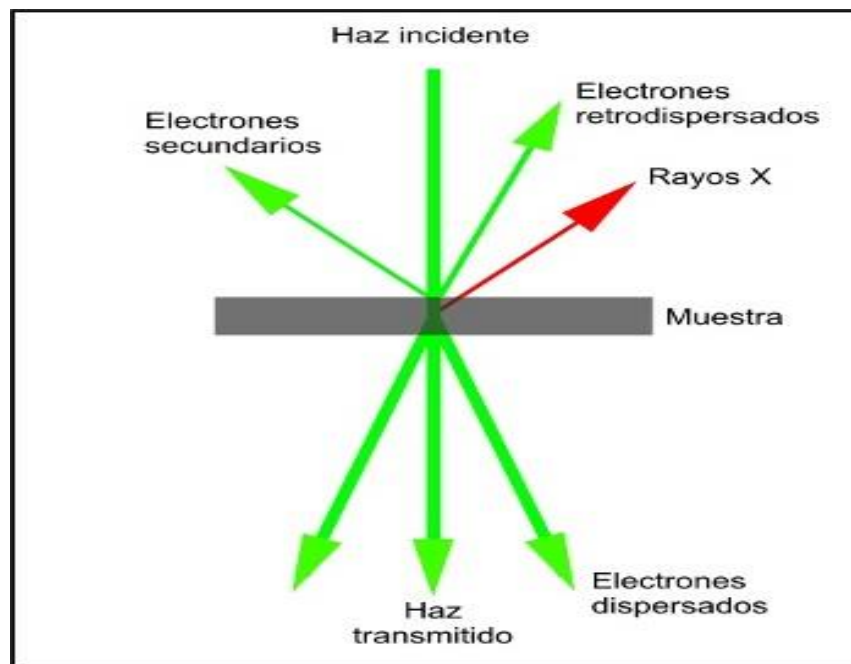


Imagen 15 Rayos presentados y usados en el MEB. Fuente: el autor

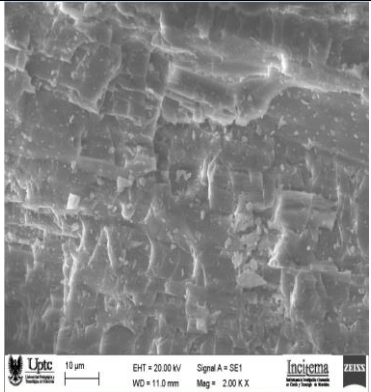
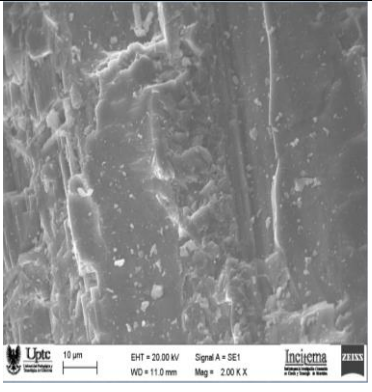
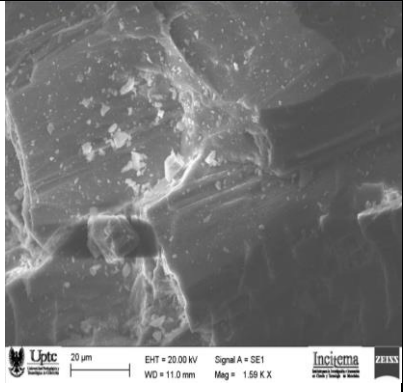
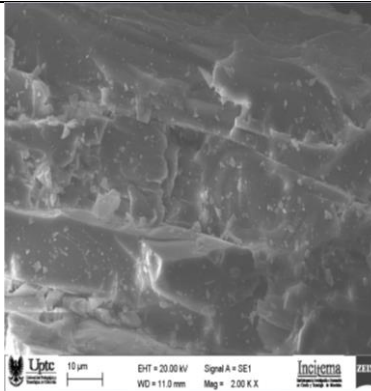
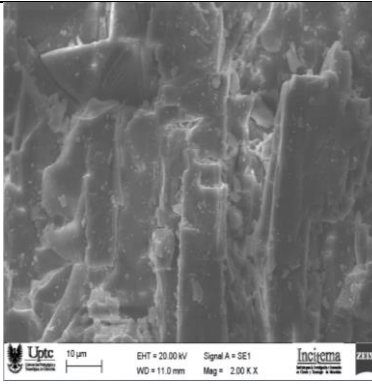
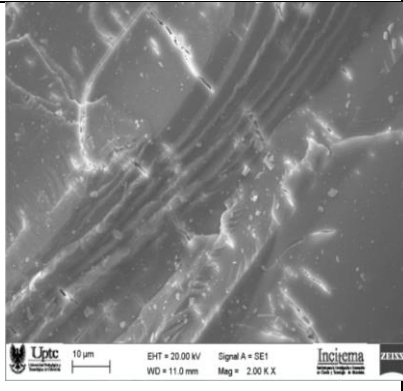
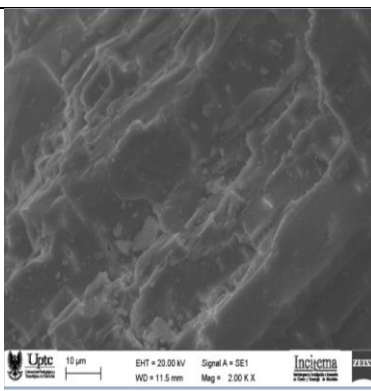
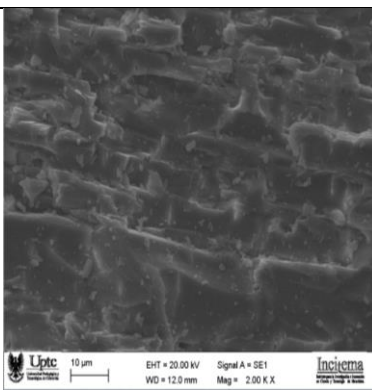
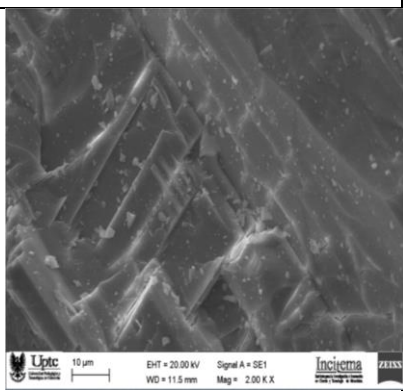
Como se ha mencionado, estas no fueron granuladas, por lo que no se observan porosidades como si las tendría si hubiesen sido templadas.

Estas escorias, como ya se mencionó, tuvieron un proceso lento de enfriamiento, por lo que tuvieron tiempo de empezar a cristalizar. Para efectos de la investigación, el análisis de microscopia electrónica de barrido en fase cristalina ofrece una mayor resolución de lectura, siendo esto positivo,

A las tres muestras analizadas, se les tomo tres micrografías, en diferentes posiciones. Estas micrografías fueron tomadas haciendo uso de los rayos secundarios y retrodispersados.

En la siguiente tabla se observan las micrografías de la Microscopia Electrónica de Barrido. Cada micrografía tiene un ancho de aproximadamente 60 μ m.

Tabla 10 las micrografías de la Microscopia Electrónica de Barrido,

MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3
		
		
		

Fuente: el autor

Los ortopiroxenos y los clinopiroxenos poseen un hábito prismático granular, pero los primeros son subhedrales, es decir, algunas de las caras están bien formadas, mientras que los segundos son anhedrales, es decir, granos con formas irregulares.

La Enstatita y la Ferrosilita se encuentran dentro del grupo de los ortopiroxenos, mientras que la Augita se encuentra dentro de grupo de los monoclinopiroxenos.

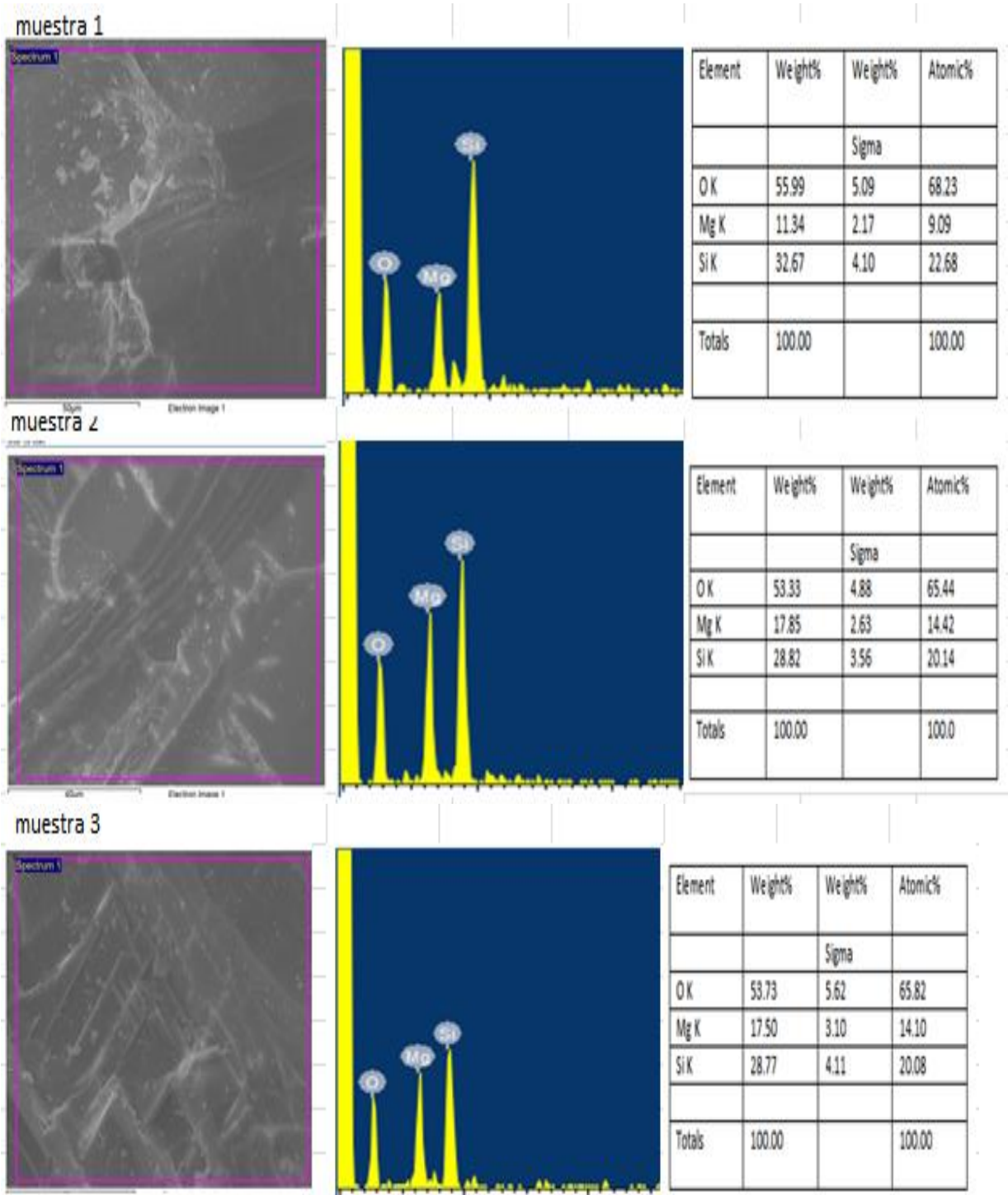
En las 3 micrografías de la muestra **#1 y #2**, resultan ser de morfología astillosa, tabular, lo que indica que se trata de la morfología típica de los ortopiroxenos, familia en la cual se encuentran las enstatites-ferrosiltes. Este hecho es congruente con los datos obtenidos de esta fase mineralógica, la cual corresponde al 17%, según la petrografía practicada. En cambio, la muestra **#3** muestra algo diferente: la primera micrografía de esta muestra expone lo que parece ser una fractura concoidea, la segunda micrografía muestra laminillas superpuestas, y la tercera evidencia una pequeña macla, propia de los cristales prismáticos. Estas tres particularidades encontradas, la fractura concoidea, las laminillas y la macla encontrada, son propias de los clinopiroxenos, familia que comprende a la Pigeonita, la cual se encuentra en un 62%. La Pigeonita suele confundirse a veces con la Augita, ya que la Augita es un aluminosilicato de Ca, Mg y Fe, mientras que la Pigeonita es un silicato de Ca, Mg y Fe. Debido a que se detectó aluminio en la espectroscopia de absorción atómica, de interpreta entonces que también hay presencia del aluminosilicato Augita.

Estas micrografías tienen la particularidad de haberse practicado en forma cristalina, permitiendo una mayor resolución de lectura y apreciando superficialmente el tipo de cristalización que presentó durante el enfriamiento lento.

Adicionalmente, con el EDS acoplado al Microscopio Electrónico de Barrido, se hizo análisis químico a las mismas tres muestras de escorias de ferroníquel, en donde se evidencia la presencia mayoritaria de los elementos químicos como lo son el Si y el Mg. Con el EDS se puede identificar la composición química puntual de la muestra de escoria, la cual se puede contrastar con la composición química determinada en el ensayo de espectroscopia de absorción atómica.

En la siguiente tabla se muestran las micrografías, los espectros obtenidos y el porcentaje en peso de los elementos químicos constituyentes, para posterior contraste con la composición química del espectrómetro de absorción atómica:

Tabla 11 Micrografía, espectro y resultados cuantitativos de cada una de las muestras de escorias de ferroníquel.



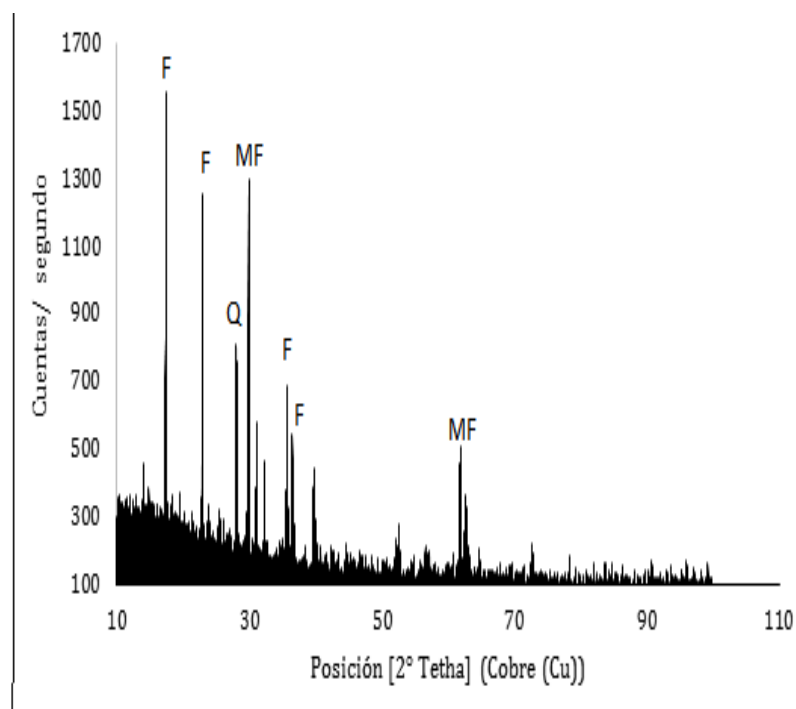
Fuente: el autor

En estos análisis corroboramos lo anteriormente dicho, cuando se refirió que el oxígeno hacía parte de aproximadamente el 50% del total de la muestra. También se observa aquí que el magnesio se encuentra de manera importante, por lo que se consideran estas escorias como de silicatos magnesianos.

5.1.3.2 Difracción de rayos X

La Difracción de rayos X fue practicada a las muestras #1 y #2, respectivamente, obteniéndose los siguientes difractogramas. Difieren en formato debido a que el difractograma de la muestra #2 fue realizada en la Universidad Nacional de Colombia y la segunda en la UPTC.

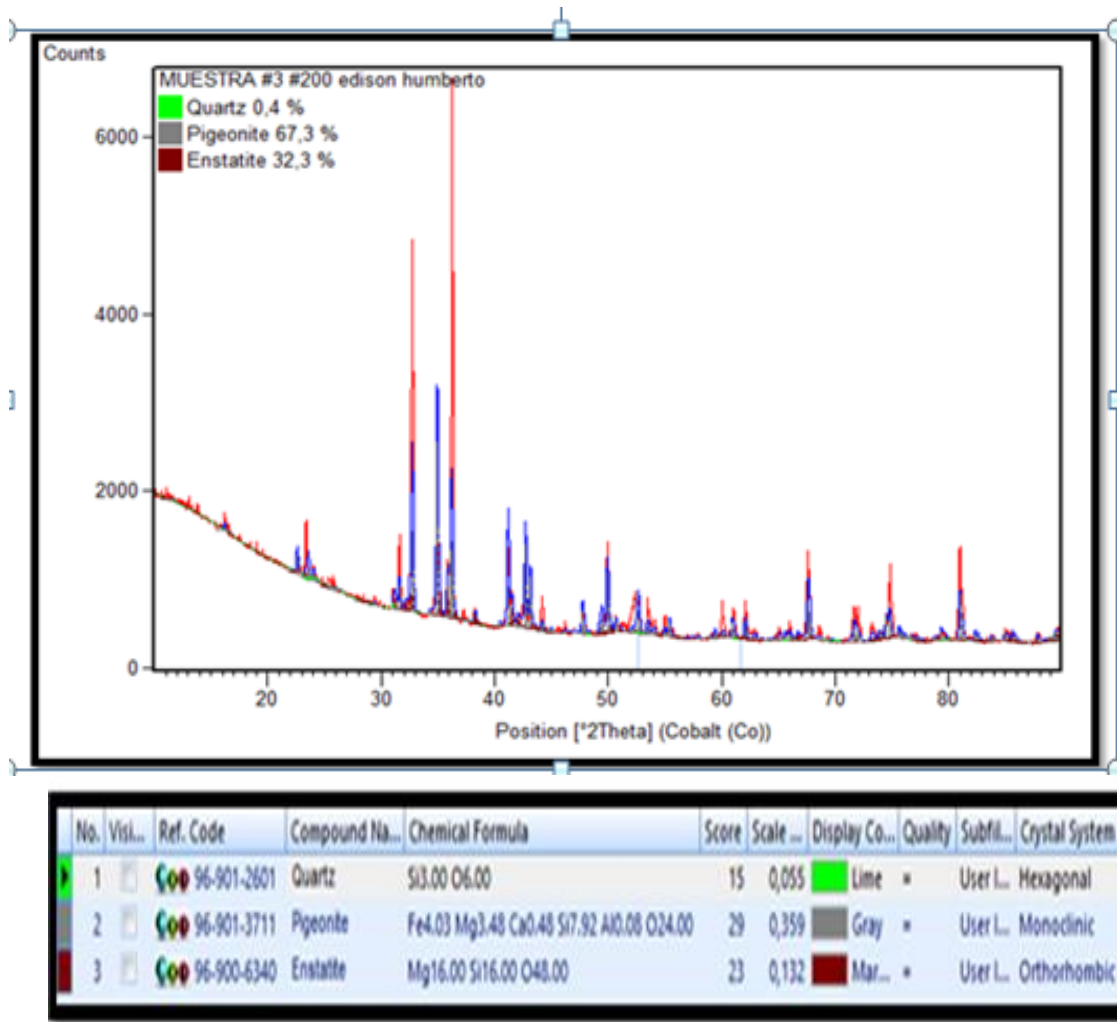
Imagen 16 Difractograma de rayos X para una muestra #2 escoria de ferroníquel: F: Forsterita, Q: cuarzo, MF: Magnesio ferrita



Fuente: el autor.

En el siguiente gráfico se tiene el difractograma de la muestra de escoria 3:

Imagen 17 Difractograma muestra #3 de escoria de ferroníquel



Fuente: el autor. UPTC.

Los picos de coloración roja indican el espectro esperado en el análisis, y en azul el espectro obtenido, estableciéndose entonces una correspondencia de picos, lo que da confiabilidad a los análisis practicados.

Para una mayor apreciación de este análisis cualitativo y cuantitativo, se representa en un diagrama de pastel las especies mineralógicas encontradas en las muestras de escorias de ferroníquel. Este diagrama se muestra a continuación:

Imagen 18 Diagrama de resultados de composición porcentual de la muestra #3

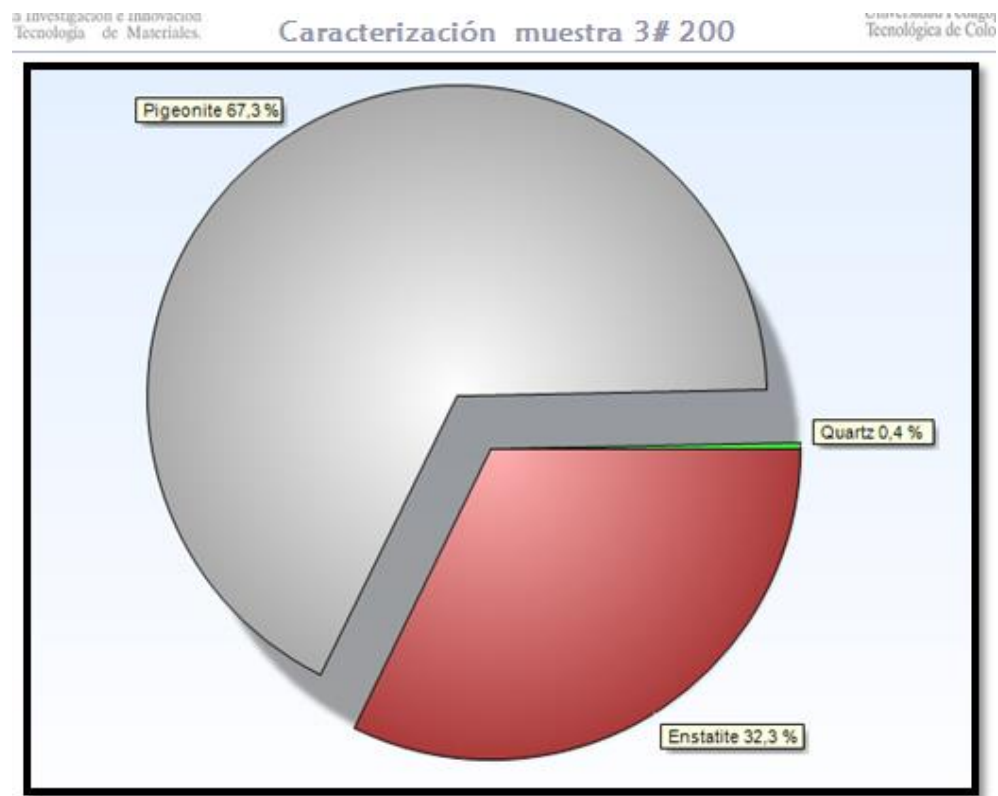


Ilustración 5: Diagrama de resultados de Composición porcentual de la muestra Analizada.

Fuente: el autor

Se tiene que más de las dos terceras partes pertenece a la Pigeonita, cuya fórmula química es $(\text{Mg, Fe, Ca}) \text{SiO}_3$, y que el restante tercio corresponde a la Enstatita, $(\text{Mg}) \text{SiO}_3$.

Los resultados obtenidos por petrografía y difracción de rayos X son precisos y confiables. Sin embargo, se observa que las cantidades de Enstatita-Ferrosilita y Pigeonita discrepan bastante. Esto obedece a lo siguiente:

Las muestras de escoria de ferroníquel se caracterizaron petrográficamente en función de la **forma** cristalina, es decir, en función de la forma de sus caras cristalinas, mientras que en el ensayo de difracción de rayos X se caracterizaron en función de su sistema cristalino. Estas escorias, como ya se mencionó, fueron enfriadas a temperatura ambiente, teniendo tiempo de presentar algún desarrollo cristalino, obteniéndose entonces formaciones de caras cristalinas parciales y nulas, es decir, subhedrales y anhedrales, respectivamente. Entonces, el olivino, que es el mineral que

conforma mayoritariamente la escoria, presenta desarrollo cristalino parcial, sin cambiar de estructura cristalina. Es este cambio isomorfo lo que explica las diferencias presentadas en los porcentajes composicionales, en donde se mantiene la estructura cristalina, presentando variación estequiometría, simultáneamente.

Tabla 12 Especies mineralógicas encontradas en las muestras de escoria de ferroníquel.

Componentes		Volumen en %	Forma	Tamaño
Fase Amorfa	Opacos	5.0	amorfa	amorfo
	Vítrea	2.0	amorfa	amorfo
Fase Cristalina	Ortopiroxeno-Enstatita-Ferrosilita	62.0	subhedral	Menor a 850μ
	Clinopiroxeno	17.0	anhedral	Menor a 500 μ
	Olivino	14.0	anhedral	Menor a 500 μ
Total		100.0		

Fuente: el autor.

Para explicar el fenómeno presentado, se presenta el sistema cristalino, el habito cristalino y su respectiva fórmula química en la siguiente tabla:

Tabla 13 Fases cristalinas presentes en la escoria

Estructura cristalina	Sistema cristalina	Habito cristalino	Formula química
Enstatita	ortorrómbico	Cristales subhedrales, tabular.	(Mg)SiO ₃
Ferrosilita	ortorrómbico	Cristales subhedrales, tabular	(Fe)SiO ₃
Pigeonita	Monoclínico prismático	Cristales anhedrales, prismáticos	(Mg,Fe,Ca)SiO ₃
Olivino	Ortorrómbico	Son raros	(Mg,Fe)SiO ₃

Fuente: el autor

El olivino, que es el mineral que está presente en la escoria casi en su totalidad de su masa, llega a transformarse solo parcialmente, por lo que alcanza a presentar desarrollo parcial de algunas caras, es decir, adquiere habito subhedral, transformándose entonces parte del olivino, serie isomorfa que va desde la Fayalita hasta la Forsferita, en Enstatita- Ferrosilita. Su diferencia radica, en la petrografía, solo en el desarrollo cristalino parcial, y en una ligera variación estequimétrica, manteniendo el mismo sistema cristalino.

Entonces, el 14% del olivino de la petrografía corresponde al olivino que no alcanza a transformarse, por lo que permaneció indiferente al enfriamiento, mientras que el 62% si se llegó a transformar en Enstatita-Ferrosilita, y el 17% se transformó en un clinopiroxeno, sistema cristalino propio de la Pigeonita.

Ahora, en este punto se procede al análisis de los resultados obtenidos con el estado del arte, para poder sugerir los potenciales usos que pudieran tener estas escorias.

En las formas cristalinas más comunes de la sílice, en promedio, los 4 puntos (o átomos de oxígeno) de la estructura de SiO_4 (que está en forma de tetraedro) se comparten con otros tetraedros de SiO_4 , por lo que a pesar de que se puede ver un SiO_4 tetraedro en el cristal, no está aislado sino conectado a otros tetraedros SiO_4 compartiendo átomos de oxígeno. Las cantidades relativas resultantes de silicio y oxígeno en la estructura cristalina conducen a la fórmula química neta: SiO_2 . Es por esto que, a pesar de que el silicio se encuentre en las escorias bajo la forma de los iones SiO_4 y SiO_3 , el análisis considera la presencia de la molécula SiO_2 .

6. EVALUACIÓN DE USOS POTENCIALES DE ESCORIA DE FERRONÍQUEL EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN

Para la sugerencia de los posibles usos que pudieran tener las escorias de ferroníquel evaluadas, se tendrá en cuenta solo las caracterizaciones de tipo físico y químico, ya que para este caso, la mineralogía estudiada se empleó para correlacionar datos de los resultados obtenidos por los otros métodos que se usaron, y para corroborarlos. La utilización de estos “desechos” industriales depende casi que exclusivamente de estas dos propiedades, las químicas y las físicas.

6.1 ANÁLISIS QUÍMICO

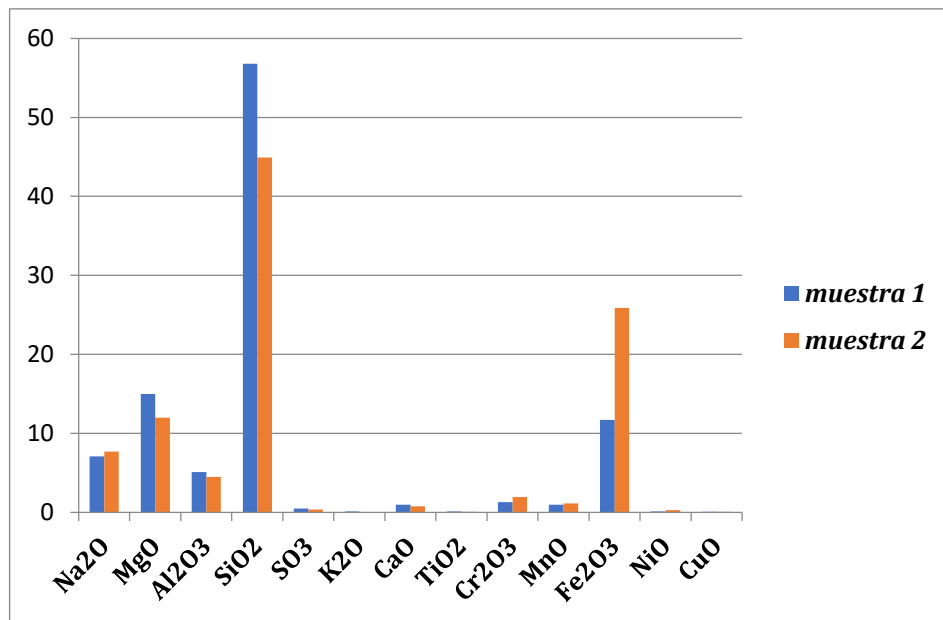
6.1.1 Espectroscopía de Absorción Atómica y Espectroscopía de Fluorescencia de rayos X

Para el análisis químico se practicaron ensayos de Absorción Atómica y Fluorescencia de rayos X. Estos dos ensayos se complementan entre sí, teniéndose en cuenta que el equipo de Fluorescencia no se encontraba calibrado al momento de practicarse el ensayo. Por eso se presenta una ligera variación entre las dos muestras, como se aprecia en la siguiente gráfica. Sin embargo, la variación de los resultados en la fluorescencia son mínimos, por lo tanto, aceptables para los objetivos que persigue el presente trabajo de investigación.

La grafica 6 muestra que la escoria número 1 es más rica en SiO_2 , pero es más pobre en Fe_2O_3 . Los demás compuestos químicos mantienen su porcentaje entre muestras. Sin embargo, en ambas muestras analizadas se observa que existe mayoritariamente SiO_2 , Fe_2O_3 y MgO , principalmente, seguido de Al_2O_3 .

Al tomarse el promedio de las composiciones químicas de las tres muestras de escoria analizadas, junto con datos de las composiciones químicas de escorias de ferroníquel hechas por la Universidad Nacional de Colombia y por la Universidad Simón Bolívar, se obtiene la siguiente gráfica 14.

Gráfica 6 Variación composición química muestras #1Y #2 de escoria de ferroníquel



Fuente: el autor

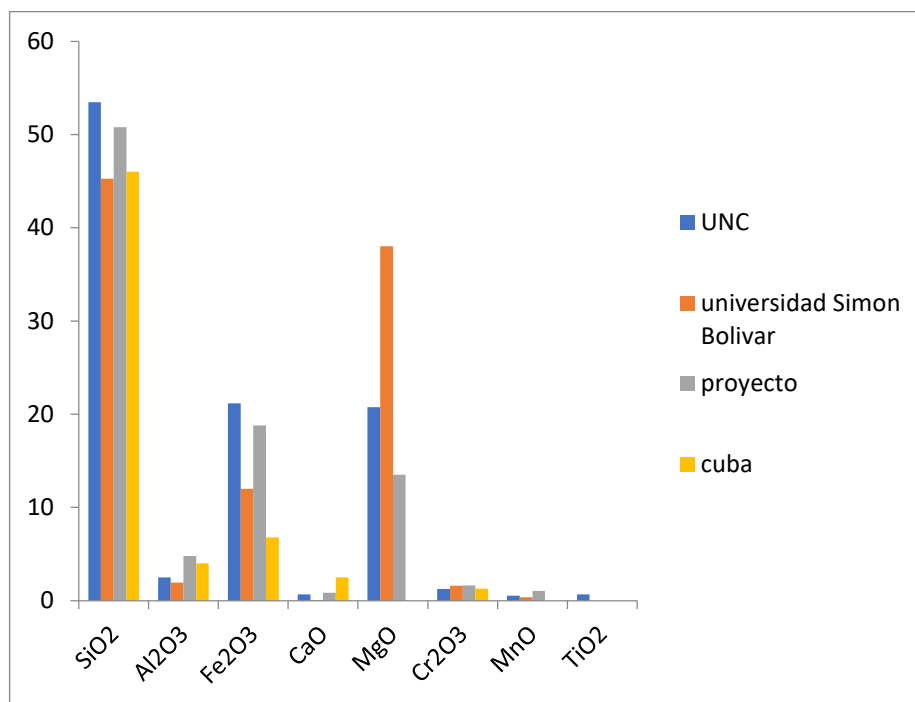
Tabla 14 Composiciones químicas escorias colombianas de ferroníquel

Composición química (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	MnO	TiO ₂
UNC	53,48	2,49	21,16	0,67	20,75	1,26	0,55	0,67
Universidad Simón Bolívar	45,25	1,95	12	0,065	38,03	1,61	0,36	
Proyecto	50,8	4,8	18,8	0,87	13,5	1,64	1,07	
Cuba	46	4	6,8	2,5		1,3		

Fuente: Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.

Con estos porcentajes tabulados, se obtiene la siguiente grafica:

Gráfico 7 Proporcionalidad de los constituyentes principales de las escorias.



Composiciones químicas escorias colombianas de ferroníquel. Fuente: universidad nacional de Colombia, universidad Simón Bolívar y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia

En la gráfica anterior se observa que la composición química de las escorias de ferroníquel halladas en el proyecto es similar a las halladas por parte de la Universidad Nacional de Colombia y la UPTC. Es evidente también que las sustancias constituyentes más importantes son el SiO₂, el MgO y el FeO.

Es interesante observar que la composición de estas escorias es muy similar a la de algunos productos industriales tales como los de la familia de los cerámicos. Para una mejor apreciación, se toman las composiciones químicas estándar de los diferentes elementos industriales de naturaleza cerámica, y se contrasta con la composición química de nuestras escorias:

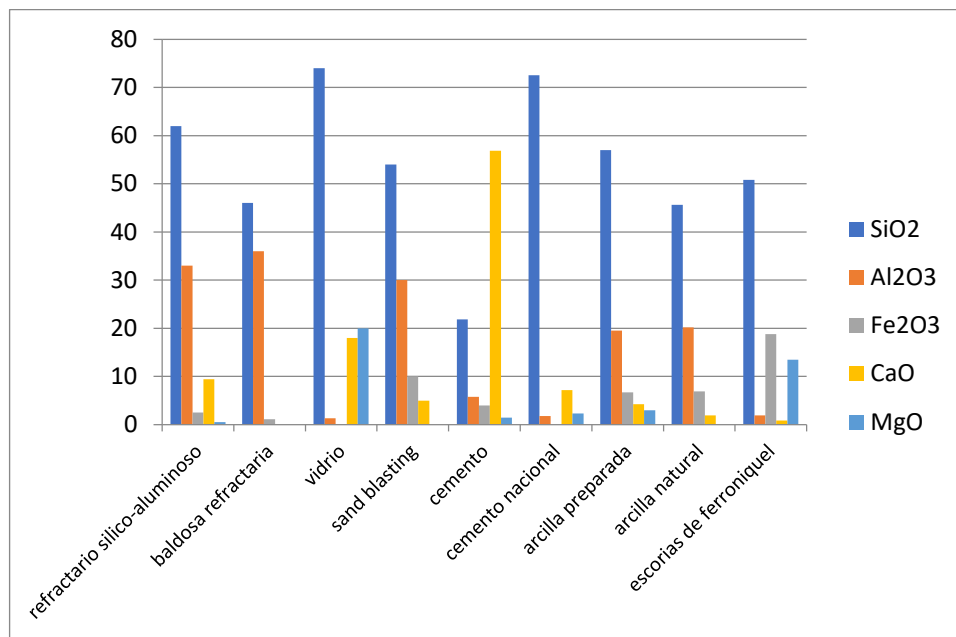
Tabla 15 Composiciones químicas de productos cerámicos, arcillas y escoria de ferroníquel analizada

Composición química (%)	SiO₂	Al₂O₃	FeO	CaO	MgO
Refractario sillico-aluminoso	62	33	2,5	9,4	0,5
Baldosa refractaria	46	36	1,1		
Vidrio	74	1,3	0,1	18	20
Sand blasting	54	30	10	5	
Cemento	21,87	5,75	3,95	56,85	1,44
Cemento nacional	72,5	1,8		7,15	2,3
Arcilla preparada	57	19,5	6,7	4,26	3
Arcilla natural	45,6	20,2	6,9	1,9	
Escorias de ferroníquel	50,8	1,95	18,8	0,87	13,5
Promedio	48,2	11,075	12,85	1,4	6,75

Fuente: autor.

Con los datos anteriores se obtiene la siguiente gráfica:

Grafico 8 Diagrama de barras de composiciones químicas de productos cerámicos, arcillas y escoria de ferroníquel analizada



Fuente: autor.

Del anterior diagrama se observa nuevamente que la sustancia química relevante en todos los productos analizados es el SiO₂, seguido por la alúmina y el óxido de hierro. Los refractarios contienen un porcentaje muy superior de alúmina con respecto a los demás usos, mientras que el cemento es muy rico en CaO. La composición química más cercana a las escorias es la del vidrio, pues las proporciones de cada constituyente son similares, excepto que lo que tiene la escoria de óxido de hierro, lo tiene el vidrio de óxido de calcio, aproximadamente.

Todos los materiales mencionados atrás tienen en común sus constituyentes químicos principales, con algunas variaciones debido a su origen.

Se observa también que podría ser posible una mezcla de escoria de ferroníquel con arcilla natural, en una relación tentativa o exploratoria de 50-50, obteniéndose los siguientes resultados:

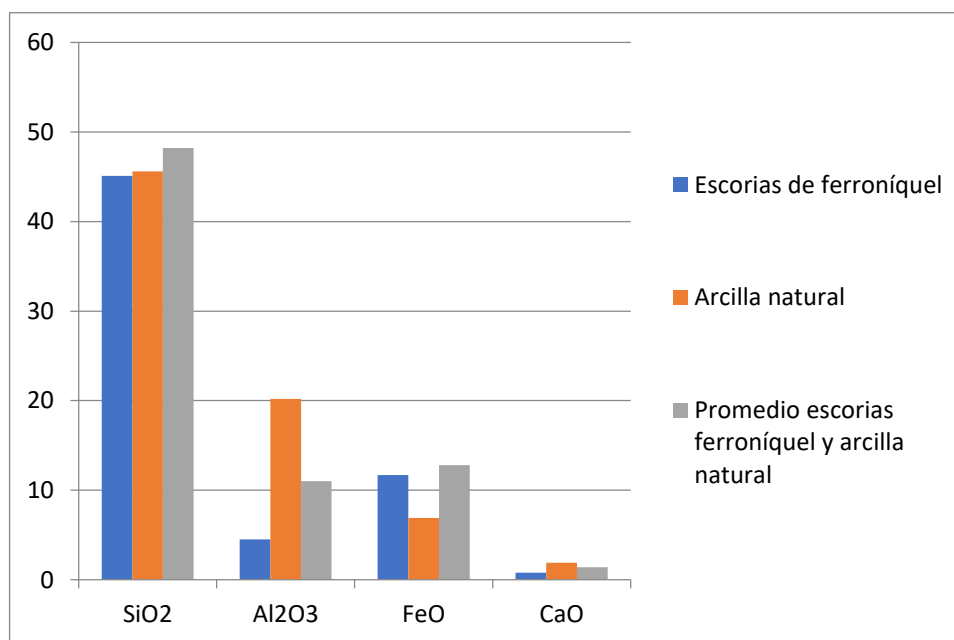
Tabla 16 Composición química escoria de ferroníquel, arcilla natural y mezcla 50-50 escoria de ferroníquel con arcilla natural.

Composición química (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO
Escorias de ferroníquel	45,1	4,5	11,7	0,8
Arcilla natural	45,6	20,2	6,9	1,9
Promedio escorias ferroníquel y arcilla natural	48,2	11,0	12,8	1,4

Fuente: el autor

Con los datos de la tabla anterior se consigue el siguiente gráfico:

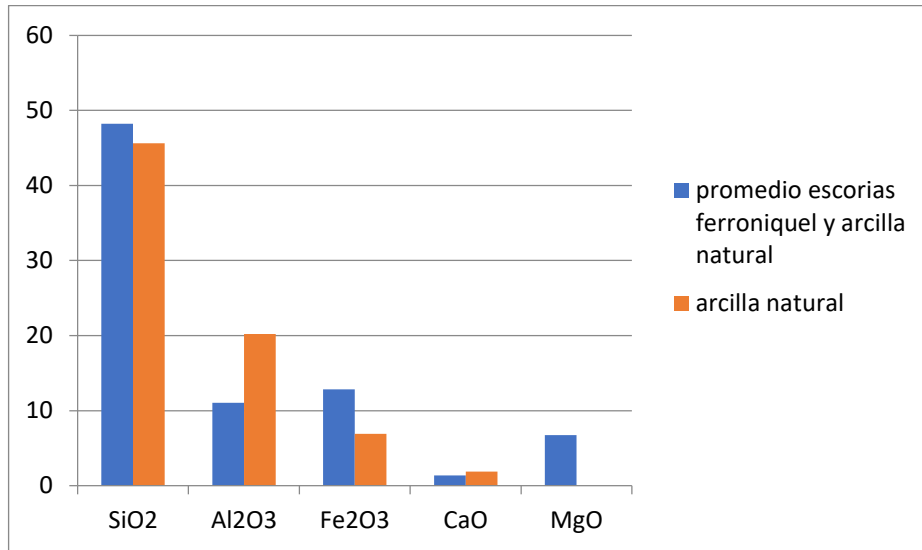
Grafico 9 Diagrama de contraste composicional entre la escoria, la arcilla y la mezcla 50-50



Fuente: el autor

Se observa que realizándose una mezcla 50-50 de escoria de ferroníquel y arcilla natural, se obtiene una composición química similar a la de la arcilla natural, es decir, se hace un ajuste composicional químico en frío. En la siguiente gráfica se observa el contraste entre la composición de la arcilla natural y de las escorias ya mezcladas con arcilla natural:

Grafica 10 Diagrama variación composición química de la escoria



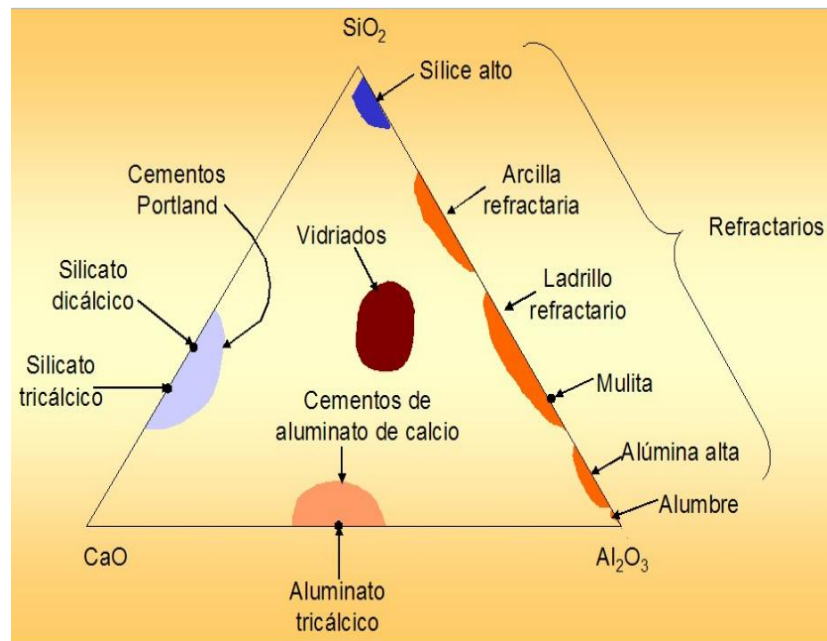
Fuente: el autor

La anterior gráfica sugiere que podría ser posible intentar mezclas en diferentes proporciones para que las escorias puedan ser usadas como materia prima sustituta parcial en conjunto con las arcillas. Esto no solo permitiría el ajuste de composición química en frío que se requiere para asimilarse a la composición química estándar de las arcillas, sino que además soluciona en parte la relativa poca superficie específica que poseen estas escorias.

Aunque si bien es cierto que el temple le otorga propiedades puzolánicas a las escorias, también es verdad que el área específica y su morfología laminar típica, no se alcanzan a lograr como la de las arcillas, por lo que se recomienda agregarlo como sustituto parcial. Siempre será mejor emplearse en una determinada fracción, que no suele sobrepasar el 60% o el 70%.

Las escorias básicas han demostrado ofrecer buenos resultados en la fabricación de bases, sub-bases y pavimentos, cementos y concretos, debido, entre otros, a su propia naturaleza básica, pues son escorias ricas en CaO. Variando los porcentajes de composiciones de este tipo de escorias se pueden obtener algunos productos industriales de la construcción, como los cementos. El siguiente es un diagrama ternario, en el que se ilustra las zonas donde se obtienen determinados productos, en función de su composición química porcentual:

Imagen 19 Diagrama ternario del CaO-SiO₂-Al₂O₃



Fuente:

https://www.google.es/search?q=diagramas+ternarios&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjo7b3E-qbZAhWBtlkKHQVOCIEQ_AUICigB&biw=1024&bih=588#imgsrc=q787JbtP0-q4M:

Este diagrama nos permite inferir que para la fabricación de cementos Portland la escoria debería poseer de un 50-70% de CaO, de 5-10% de alúmina y de un 30-35% de SiO₂, siendo este diagrama congruente con las tablas composicionales químicas citadas. Estos datos son congruentes a los de las tablas, en donde se muestra las composiciones químicas de los diferentes productos mostrados.

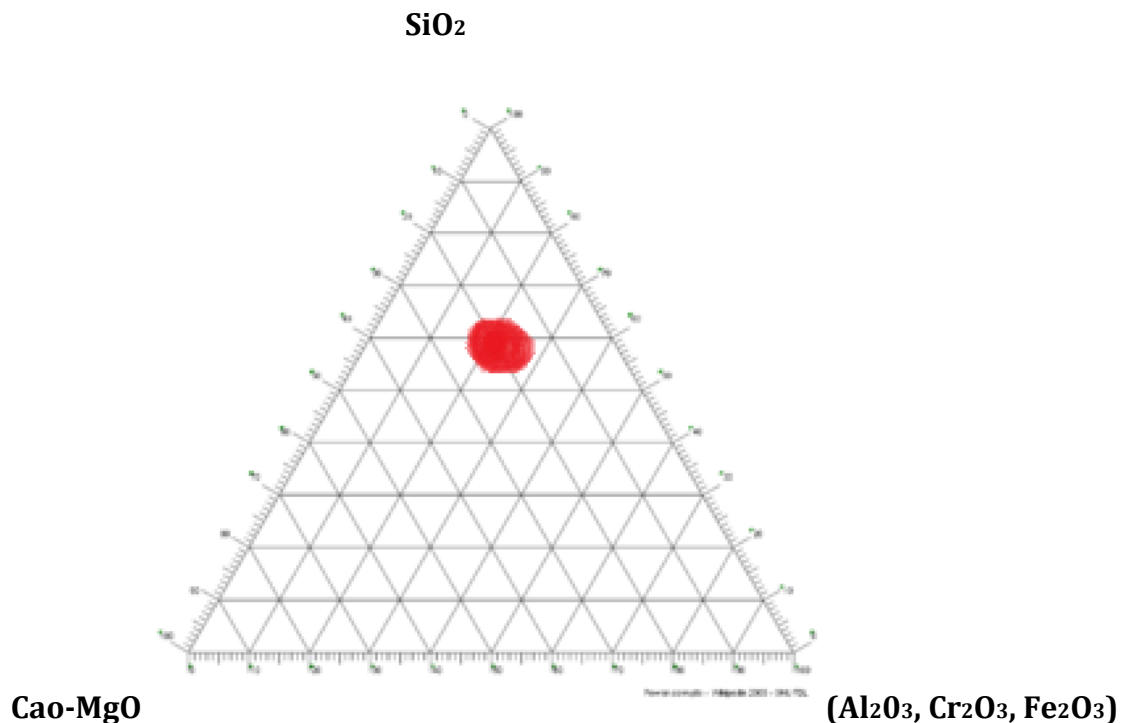
También se puede observar que los ladrillos refractarios son muy pobres en CaO, mientras que son muy ricos en SiO₂ y Al₂O₃. En cambio, la arcilla refractaria es más rica en SiO₂ que en Al₂O₃, estando compuesta por un 70-75% de SiO₂ y un 5-10% de Al₂O₃, siendo el resto otros óxidos de menor importancia. Nuestras escorias encajan muy bien en esta zona, pues los ajustes químicos que fueren menester realizar son mínimos, ya que las composiciones químicas de las escorias y estas arcillas es muy semejante, como se demostró en los diagramas anteriores.

Por lo general, las escorias que habrán de ser parte integral de un producto industrial, como el cemento, lo hacen de manera parcial: aunque ofrecen buenas propiedades físicas y mecánicas, no han sido nunca sustituidas en un 100%, ya que se estarían sacrificando en últimas algunas propiedades mecánicas finales del producto

terminado. En el caso de los ladrillos, es aconsejable que no sobrepase el 50%, hasta tanto se hagan ensayos en posteriores estudios, porque aunque tengan fase vítrea, el área específica puede ser menor a la de las arcillas, puesto que estas poseen microestructuras laminares, con mucha área superficial, entre las cuales se introduce el agua, rompiendo los enlaces de Van der Waals existentes entre estas, permitiendo que se deslicen entre sí, produciéndose la plasticidad.

Las escorias de ferroníquel son ricas en SiO_2 , MgO y Fe_2O_3 , conteniendo también otros óxidos como el CaO , Cr_2O_3 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , de naturaleza anfótera. Ubicando esta composición en el diagrama ternario, se tiene:

Imagen 20 Diagrama ternario de fases (MgO-FeO)-($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$)-(SiO_2)



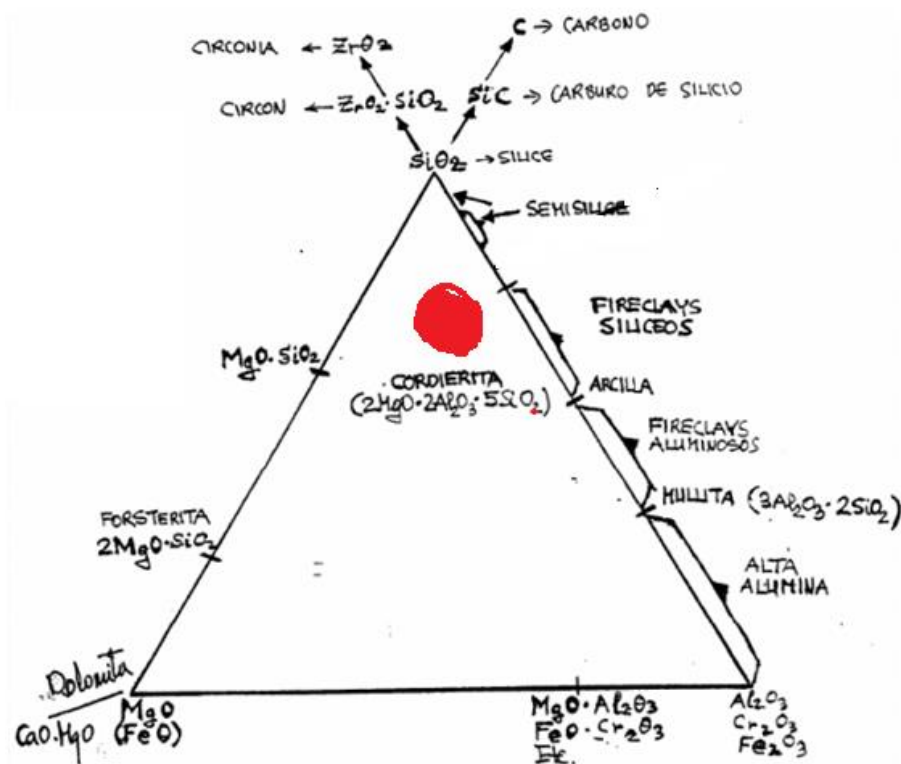
Fuente:

https://www.google.es/search?q=diagramas+ternarios&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj07b3E-qbZAhWBtlkKHQVOCIEQ_AUICigB&biw=1024&bih=588#imgrc=q787jbtP0-q4M.

Con esta composición química y a temperaturas cercanas a los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, se obtiene cordierita, el cual es empleado en materiales refractarios. Sin embargo, es posible usarlo para otros fines, como ladrillos refractarios de alta alúmina o de alto sílice, haciendo mezclas en frío con otros tipos de arcilla,

En el siguiente esquema se tiene el diagrama ternario del sistema fases (MgO-FeO)-(Al₂O₃-Cr₂O₃-Fe₂O₃)-(SiO₂), donde se aprecia las zonas en donde se obtiene algunos productos cerámicos. Es importante resaltar que la exigencia de composición química es flexible, no es estricta. Las propiedades mecánicas finales se logran al final del proceso, después de la cocción, factibilizando el uso de las escorias de ferróníquel para estos fines.

Imagen 21 Diagrama ternario de fases (MgO-FeO)-(Al₂O₃-Cr₂O₃-Fe₂O₃)-(SiO₂) con las fases presentadas.



Fuente:

<https://www.google.es/search?q=diagramas+ternarios&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwj07b3E-qbZAhWBtlkKHQVOCIEQAUICigB&biw=1024&bih=588#imgsrc=q787jbtP0-q4M>

6.2 ANÁLISIS FÍSICO

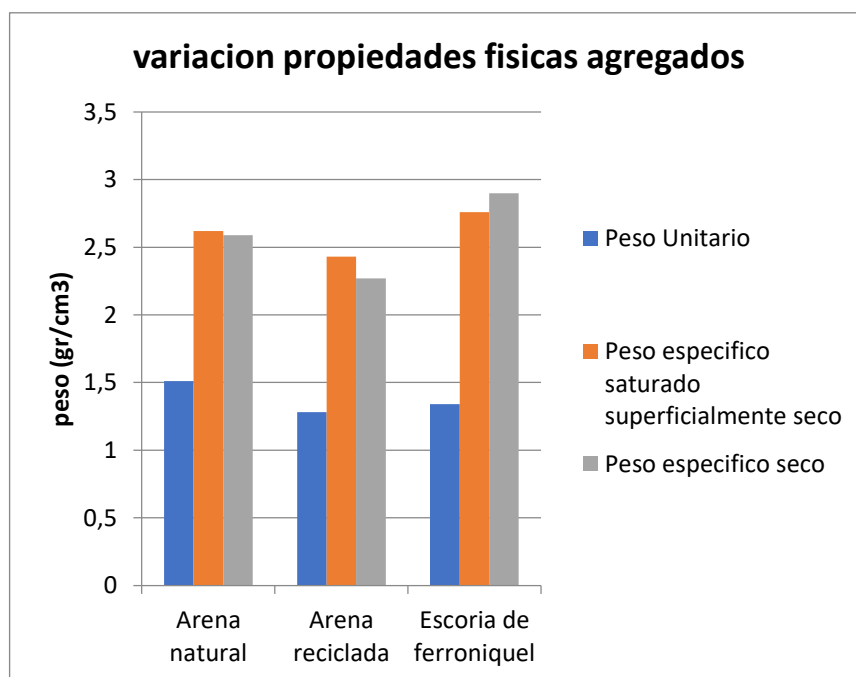
6.2.1 Peso unitario, densidad real, densidad real como agregado saturado superficialmente seco, y porcentaje de absorción

Las densidades halladas bajo norma internacional ASTM quedan registradas para análisis posteriores, ya que son propiedades elementales de las escorias y en general de los agregados para la construcción, las cuales podrían servir para una eventual fabricación de cementos y concretos, principalmente.

En la siguiente tabla se tiene algunas propiedades físicas tipificadas como fundamentales al momento de clasificarlas el árido o la arena como apto para ser utilizada para fabricar cementos, y su respectiva gráfica:

Parámetro	Arena natural	Arena reciclada	Escoria de ferroníquel
Peso Unitario	1,51	1,28	1,34
Peso específico saturado superficialmente seco	2,62	2,43	2,76
Peso específico seco	2,59	2,27	2,9

Tabla 17. Variación propiedades físicas de agregados. Fuente: el autor.



Grafica 11. Variación propiedades físicas de agregados. Fuente: el autor

En el diagrama anterior se constata la gran similitud de las propiedades físicas de una arena natural, una arena reciclada y la escoria de ferroníquel en cuestión. Se vislumbra aquí una gran aptitud de uso de las escorias de ferroníquel analizadas, ya que su peso unitario, el peso específico saturado, el peso específico seco y la absorción presentan una variación despreciable, presentando en cambio una gran ventaja con la relación a la arena reciclada, ya que esta última presenta un elevado porcentaje de absorción, lo que la hace poco atractiva, debido a que esto implica un mayor costo por tener que emplearse mucho más agua para llevar a cabo eficientemente el proceso de hidratación del concreto, conllevando mayores gastos y mayor impacto ambiental.

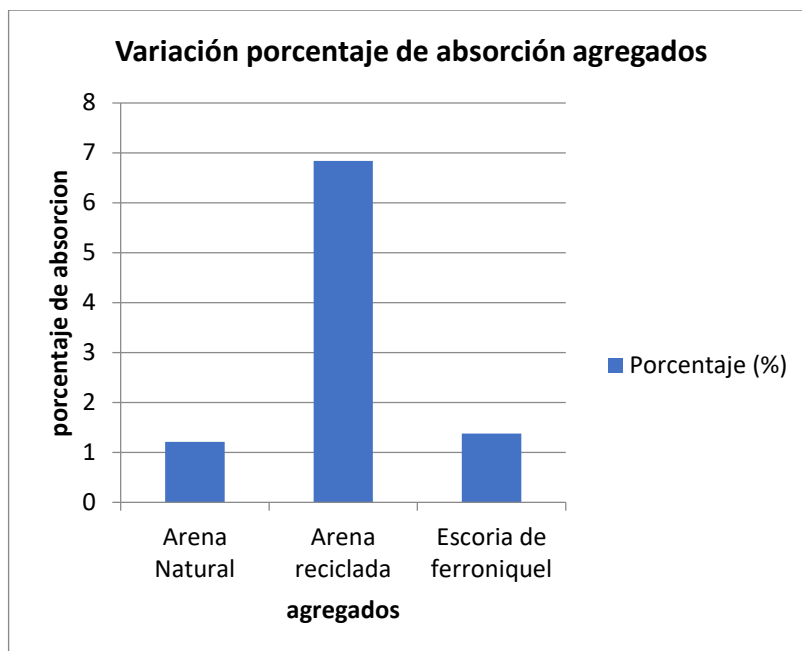
En la siguiente tabla se tiene los coeficientes de absorción, para los agregados en análisis, con la respectiva gráfica:

Tabla 18 Porcentaje de absorción de los agregados de construcción.

Parámetro	Material	Arena Natural	Arena reciclada	Escoria de ferroníquel
Absorción (%)	Porcentaje (%)	1,21	6,84	1,38

Fuente: el autor.

Gráfico 12 Variación porcentaje de absorción agregados



Fuente: el autor.

Adicionalmente, se debe decir que el patrón de fractura de las arenas recicladas es muy anguloso e irregular con respecto a las naturales, mientras que el patrón de fractura de las arenas naturales es redondeado.

La esfericidad relaciona la forma del grano con una esfera de igual volumen y a pesar de que esta característica es determinada cualitativamente, sirve para clasificar los granos angulosos y redondeados en alto y bajo grado de esfericidad, conforme se aproxime o no a la forma esférica. El redondeamiento describe la suavidad de los contornos y su grado de curvatura. (González y otros, 1991).

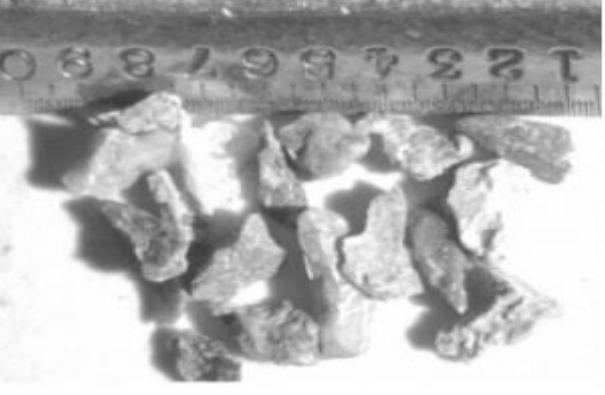


La forma y textura superficial de las partículas influyen considerablemente en las propiedades del mortero. Las partículas con mayor textura áspera, angulosas y alargadas, requieren más pasta de cemento y mayor cantidad agua para producir un mortero más trabajable. Análogamente, la distribución del tamaño de las partículas afecta el comportamiento del mortero: las arenas gruesas aumentan su resistencia a compresión pero reducen la trabajabilidad, mientras que las arenas finas, aunque produzcan morteros trabajables, reducen su resistencia y adhesión. (Gallegos, 1992).

Las escorias de ferroníquel si tienen una fractología semejante a la de la arena natural la cual es redondeada, con ángulos muy angulosos. Es posible que ese patrón se deba al tipo de trituradora y el tiempo suministrado en la misma. Sin embargo, al lograrse agregados gruesos y finos con ambos tipos de fractología, eventualmente se podría diseñar una mezcla de ambos optimizando la densidad específica y la resistencia del mortero fabricado, mediante una mezcla de arena natural con escoria de ferroníquel.

Pero la ventaja más notable del eventual uso de escoria de ferroníquel como sustituto parcial de los agregados para concreto, sería el bajo porcentaje de absorción, ya que esto significa un ahorro de agua en el proceso de hidratación del cemento, y en un ahorro económico, minimizando el impacto ambiental. Estas propiedades físicas son las que hacen interesantes a las escorias de ferroníquel en la fabricación de concretos de bajas solicitaciones.

En la siguiente tabla se tiene el tipo de fractura del agregado reciclado, agregado natural (arena) y escoria de ferroníquel:

Tabla 19 Fractología de arena reciclada, arena natural y escoria de ferroníquel.

Material	Imagen
Arena reciclada	
Arena natural	
Escoria de ferroníquel	

Fuente: el autor

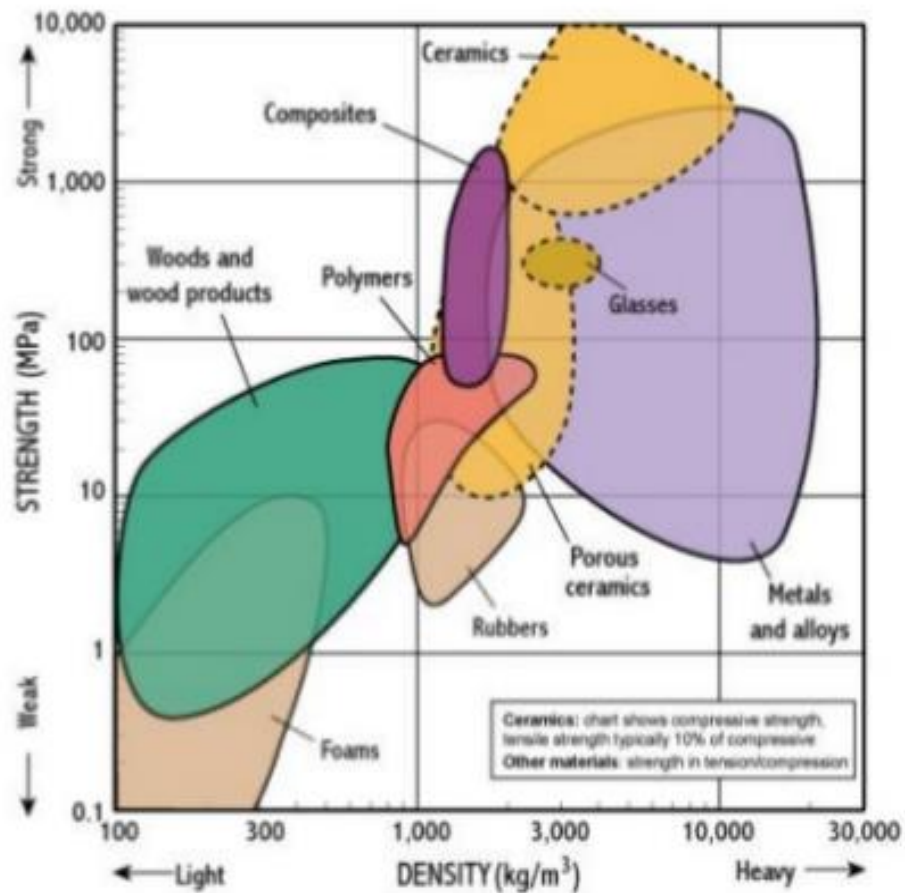
La utilización del agregado reciclado en los morteros, disminuye en cierta medida las propiedades físicas de éste, sin embargo esta reducción no produce alteraciones que puedan comprometer el desempeño de éstos puesto que los valores de sus

propiedades están dentro de un intervalo aceptable según las especificaciones de la Normas Técnicas Colombianas. Esto constituye una alternativa y el punto de partida de nuevas investigaciones relacionadas con la reutilización y aprovechamiento de las escorias de ferróníquel.

Adicionalmente, con ayuda de las gráficas para selección de materiales, del profesor Michael Ashby, se puede determinar con gran aproximación la resistencia de las escorias, en función de su densidad.

En el siguiente diagrama se puede apreciar algunas familias de materiales principales, en donde están relacionados en función de su densidad y su resistencia.

Imagen 22 Densidad vs. **Resistencia**



Fuente: CES EDUPACK, Inglaterra.

Se observa que la familia de los vidrios, aunque es de alta densidad, posee resistencias más bajas, en comparación que las arcillas, las cuales de mayor resistencia. Esas dos familias se encuentran tan estrechamente relacionadas debidos principalmente a su composición química, la cual es muy similar la una de la otra.

7. CONCLUSIONES

- Las escorias de ferroníquel analizadas son de naturaleza poli-mineral donde predomina la presencia de silicatos tipo piroxeno, relacionados a rocas ígneas ricos en hierro y magnesio, como es el caso de la Enstatita y Pigeonita.
- La composición química de las escorias colombianas de ferroníquel, expresada en forma de óxidos fundamentales, está compuesta mayoritariamente por SiO_2 , MgO y Fe_2O_3 , los cuales representan el 86% del total. Adicionalmente, están compuestas en forma minoritaria por Al_2O_3 , NiO , Cr_2O_3 , MnO , CaO , Cu_2O .
- Las escorias de ferroníquel colombianas son similares a las escorias de otras plantas de ferroníquel del mundo, y son de baja acidez, con respecto a otras de su tipo.
- Las escorias de ferroníquel están conformadas principalmente por 67,3% de Pigeonita, la cual es un silicato de magnesio, hierro y calcio, y en un 32,3% de Enstatita, que es un silicato de magnesio.
- El peso unitario, el peso específico saturado superficialmente seco, y el peso específico seco son muy similares a los de las arenas naturales y artificiales utilizadas en la fabricación de concretos.
- El porcentaje de absorción de las escorias de ferroníquel es muy similar al de las arenas naturales, a diferencia de las arenas artificiales, cuya absorción es de 6,84, casi cinco veces más que las arenas naturales. Esto se convierte en una ventaja técnica, económica y ambiental, pues esto hace que no sea necesario el empleo de mayor cantidad de agua a la mezcla, y evita incurrir en mayores gastos económicos, ofrece más practicidad y se evita el desperdicio de agua.
- Las escorias de ferroníquel, presentan propiedades químicas y físicas que la podrían hacer adecuada para el aprovechamiento de las mismas en ladrillos, tejas, adoquines, refractarios, y para la fabricación de materiales abrasivos.
- El uso de estas escorias podría mitigar significativamente el impacto ambiental que este material residual genera, en pro de la integridad de los yacimientos acuíferos y en general de los ecosistemas que se pudieran ver involucrados en esta industria.
- Se vislumbra el empleo efectivo de las escorias de ferroníquel, ya que sus características químicas y físicas así lo sugieren, ya que el mayor requisito de estas escorias para los usos que se plantearon, exceptuando a los cementos y a

los concretos, es la composición química y el porcentaje en que se encuentren sus óxidos que lo conforman, y el tratamiento térmico que se les suministre, en aras de lograr las fases cristalinas requeridas.

- Se demuestra que es posible lograr un equilibrio de beneficios económico-técnico-ambiental, para llamar la atención de la industria y materializar un proyecto cuyos resultados, de consolidarse, haría un aporte académico necesario para la industria del níquel, en cuanto eficacia y eficiencia de procesos se refiere.

8. BIBLIOGRAFIA

- Pérez, Fabio Raúl, y Pérez, Héctor Alirio. Septiembre de 2007. Estudio de las fases predominantes y caracterización de las escorias del proceso de obtención de ferroníquel. *Scientia et Technica*. Año XIII, No 36. Pág. 1-6.
- GOEHNER, Raymond P. y Nichols, Monte C. X/ ray powder diffraction. ASM Characterization. P.p. 334/343. Carvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. , p.135.
- Díaz Bello, S.C., 2016. *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Universidad Nacional de Colombia.
- Hernández, Y., Carriazo, J.G. & Almanza, O., 2006. Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from “Cerro Matoso” Mine (Colombia). *Materials Characterization*, 57(1), pp.44–49.
- Ministerio de Minas y Energia, 2009. Así Es La Minería. *Colombia Minera*, 1, p.31. Available at: www.minminas.gov.co.
- Oxley, A. & Barcza, N., 2013. Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, pp.2–13.
- Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28.
- Wilman, F., Cruz, R. & Rojas, I.F., 2009. No Title. *el níquel de colombia*, p.44.
- Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.
- Carvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. , p.135.

Díaz Bello, S.C., 2016. *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Universidad Nacional de Colombia.

Hernández, Y., Carriazo, J.G. & Almanza, O., 2006. Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from “Cerro Matoso” Mine (Colombia). *Materials Characterization*, 57(1), pp.44–49.

Ministerio de Minas y Energia, 2009. Así Es La Minería. *Colombia Minera*, 1, p.31. Available at: www.minminas.gov.co.

Oxley, A. & Barcza, N., 2013. Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, pp.2–13.

Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Mineria y geología*, 29(4), pp.13–28.

Wilman, F., Cruz, R. & Rojas, I.F., 2009. No Title. *el niquel de colombia*, p.44.

Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.

(Carvajal Vinasco 2012)Carvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. , p.135.

Díaz Bello, S.C., 2016. *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica*. Universidad Nacional de Colombia.

Hernández, Y., Carriazo, J.G. & Almanza, O., 2006. Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from “Cerro Matoso” Mine (Colombia). *Materials Characterization*, 57(1), pp.44–49.

Ministerio de Minas y Energía, 2009. Así Es La Minería. *Colombia Minera*, 1, p.31.
Available at: www.minminas.gov.co.

Oxley, A. & Barcza, N., 2013. Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, pp.2–13.

Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28.

Wilman, F., Cruz, R. & Rojas, I.F., 2009. No Title. *el níquel de colombia*, p.44.

Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.

Carvajal Vinasco, J.F., 2012. Evaluación de escorias de Córdoba para su utilización en la industria del cemento Pórtland. , p.135.

Díaz Bello, S.C., 2016. *Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica* Modelamiento cinético del procesamiento de minerales lateríticos de níquel por vía pirometalúrgica. Universidad Nacional de Colombia.

Hernández, Y., Carriazo, J.G. & Almanza, O., 2006. Characterization by XRD and electron paramagnetic resonance (EPR) of waste materials from “Cerro Matoso” Mine (Colombia). *Materials Characterization*, 57(1), pp.44–49.

Ministerio de Minas y Energía, 2009. Así Es La Minería. *Colombia Minera*, 1, p.31.
Available at: www.minminas.gov.co.

Oxley, A. & Barcza, N., 2013. Hydro-pyro integration in the processing of nickel laterites. *Minerals Engineering*, 54, pp.2–13.

Ramírez-cruz, Y., Rojas-purón, A.L. & Pons-herrera, J.A., 2013. Caracterización físico-química y mineralógica de la escoria de fundición de ferroníquel de Moa. *Minería y geología*, 29(4), pp.13–28.

Wilman, F., Cruz, R. & Rojas, I.F., 2009. No Title. *el niquel de colombia*, p.44.

Yanet, M.J., 2009. *EVALUACIÓN DE LA ESCORIA DE FERRONÍQUEL COMO AGREGADO FINO PARA MORTEROS DE ALBAÑILERÍA Y ACABADOS* Eber Otoniel Samayoa Teret.